



**Inês Margarida da Costa F. C. de Carvalho**

Licenciada em Ciências de Engenharia Civil

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Civil

# **Estudo Paramétrico do Efeito de Arco em Barragens de Terra**

Orientador: Professora Doutora Maria Teresa Teles Grilo Santana

## **Júri:**

Presidente: Prof. Doutor Daniel Aelenei

Arguente: Prof. Doutor Pedro Fernando e Mota Guedes de Melo

Vogal: Prof. Doutora Maria Teresa Teles Grilo Santana



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Dezembro, 2018**



## **Estudo Paramétrico do Efeito de Arco em Barragens de Terra**

Copyright © Inês Margarida da Costa Fernandes Carmo de Carvalho, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha orientadora Professora Doutora Teresa Santana por todo o apoio prestado durante a realização deste trabalho. Agradeço toda a disponibilidade, interesse e ajuda no fim do meu percurso académico.

À minha família, pelo apoio incondicional, pela oportunidade e pela paciência demonstrada ao longo da realização deste trabalho. Obrigada por terem sempre uma palavra de motivação para transmitir.

Aos meus amigos e colegas da FCT, André Rodrigues, Cláudia Manco, Daniel Ferreira, Filipe Loureiro, João Nunes, Nuno Peres, Pedro Castanho e Sara Lopes, um muito obrigada pela amizade, pelas aventuras, companheirismo e apoio demonstrados em tantas e tantas noites de trabalho ao longo de todo o curso. Que este percurso tenha sido apenas o início da nossa amizade.

Às minhas amigas de sempre, Filipa Rosa, Filipa Silva e Margarida Silva, por terem sempre acreditado em mim e me terem incentivado durante todo este percurso. Agradeço a vossa amizade, foram sempre incansáveis.

Gostaria ainda de agradecer ao Professor Doutor Nuno Guerra pelo entusiasmo demonstrado nas disciplinas que lecciona. Terá tido um papel muito importante na escolha do meu perfil de mestrado.

Por fim, gostaria de agradecer à Universidade Nova de Lisboa - Faculdade de Ciências e Tecnologia, pela possibilidade de aprender não só através do seu corpo docente como também pelos materiais disponibilizados.



# Resumo

Esta dissertação tem por objetivo o estudo paramétrico do efeito de arco numa barragem de terra. O efeito de arco está intrinsecamente ligado à segurança das barragens de aterro contudo, embora seja objeto de estudo em barragens de enrocamento, o seu efeito não é muito estudado em barragens de terra.

O fenómeno de efeito de arco surge associado à fase de construção da barragem, primeiro enchimento e exploração da mesma. Propõe-se o estudo deste fenómeno durante a fase de construção da barragem. pelo que se começa por uma breve descrição relativamente ao efeito de arco e qual a importância do seu estudo. A diferença entre os assentamentos ocorridos no núcleo da barragem e nos maciços durante a construção da barragem provoca uma variação de tensões no núcleo da barragem que podem levar à fraturação hidráulica. À diferença de tensões existente entre o núcleo e os maciços chamamos de efeito de arco.

Neste trabalho, recorrendo ao *software* Plaxis2D, apresenta-se um primeiro caso base descrevendo o faseamento construtivo do mesmo. Procede-se a uma análise aos deslocamentos verticais, tensões verticais totais e tensões verticais efetivas considerando vários tempos de consolidação e diferentes estados de saturação dos materiais. É ainda feito um estudo relativamente à secção a considerar para análise do efeito neste caso base e de seguida analisa-se o efeito de arco.

Por fim, efetua-se uma análise paramétrica onde se estuda a influência no efeito de arco da deformabilidade do maciço e do núcleo, da resistência ao corte no maciço e no núcleo, das inclinações dos taludes do núcleo e da altura da barragem. De onde se concluiu que o parâmetro com maior influência no efeito de arco é a deformabilidade dos maciços e do núcleo.

**Palavras-chave:** barragem de terra, efeito de arco, fraturação hidráulica, análise de elementos finitos, Plaxis2D





# Abstract

The object of study of this dissertation is the parametrical study of the arching effect of embankment dams. The arching effect on this structures is a matter of big concern because it can affect the safety of the structure. There are several studies about this phenomenon in rockfill dams but in earth dams there are not much studies to rely on.

During construction, first impoundment and exploration of the dam is possible to notice this effect. This study focuses on this effect during the construction of the dam body. The study begins with a short description of the arching effect and the reason why this study is so important. Due to the different settlements of the core and the shell material there's a load transfer from the core to the shell that can lead to hydraulic fracturing which can cause erosion problems. That difference of stress from the shell to the core is called the arching effect.

During this study and using Plaxis2D software, a set of finite element analysis was performed to assess this effect. In this analysis a zoned earth dam was simulated and parametric studies were performed to evaluate the effect of some input parameters on the soil arching: the effect of the elasticity modulus of shell and core, the effect of core slide slopes, the effect of the height dam and the effect of the shear strength.

**Keywords:** Arching effect; Earth dam; hydraulic fracturing; finite element analysis; Plaxis2D



# Índice de matérias

Índice de matérias.....	xi
Índice de figuras.....	xiii
Índice de tabelas.....	xvii
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos.....	xix
1 Introdução.....	1
1.1 Considerações gerais.....	1
1.2 Objetivo e organização da dissertação.....	2
2 Análise bibliográfica.....	3
2.1 Generalidades.....	3
2.2 Efeito de Arco.....	3
2.3. Trabalhos desenvolvidos.....	6
2.3.1 Conhecimentos gerais.....	6
2.3.2 Influência da relação entre a deformabilidade dos maciços estabilizadores e do núcleo.....	6
2.3.3 Influência da inclinação dos taludes do núcleo.....	9
2.3.4 Influência do ângulo de resistência ao corte.....	12
2.3.5 Outros parâmetros.....	12
2.3.6 Resumo dos autores analisados.....	13
3 Modelação de um caso base.....	16
3.1 Introdução.....	16
3.2 Geometria e materiais.....	16
3.3 Modelação numérica.....	18
3.3.1 Condições de análise.....	18
3.3.2 Faseamento construtivo.....	18
3.4 Estudo do tempo de consolidação.....	20
3.4.1 Cálculos efectuados.....	20

3.4.2 Tempo de construção.....	24
3.5 Análise de segurança.....	25
3.6 Efeito de Arco .....	27
4 Estudo paramétrico: Factores que influenciam o efeito de arco de uma barragem de terra.....	34
4.1 Generalidades .....	34
4.2 Influência da relação entre a deformabilidade do maciço e do núcleo.....	35
4.2.1 Generalidades .....	35
4.2.3 Tensões Verticais .....	35
4.2.4 Índice de arco, $a_r$ .....	38
4.3 Influência do Ângulo de Resistência ao Corte $\phi'$ .....	41
4.3.1 Generalidades .....	41
4.3.2 Tensões Verticais Totais .....	41
4.3.3 Índice de arco, $a_r$ .....	45
4.4 Influência da Inclinação dos taludes do núcleo.....	47
4.4.1 Generalidades .....	47
4.4.2 Tensões Verticais Totais.....	47
4.4.3 Índice de arco, $a_r$ .....	50
4.5 Altura da barragem.....	53
4.5.1 Generalidades .....	53
4.5.2 Tensões Verticais Totais.....	53
4.5.3 Índice de arco, $a_r$ .....	55
4.6 Análise de resultados.....	57
5 Considerações finais.....	62
5.1 Conclusões .....	62
5.2 Desenvolvimentos futuros.....	63
Bibliografia.....	64
Anexo A .....	66
Anexo B.....	67

# Índice de figuras

Fig. 2.1 Tensões médias totais numa barragem de aterro no final da construção (as tensões de compressão apresentam-se negativas) (Talebi et al. 2013) .....	4
Fig. 2.2 Efeito de arco considerando a relação entre $E_{\text{maciço}}$ e $E_{\text{núcleo}}$ para o estudo de Talebi et al. (2013) considerando a expressão (2.2).....	7
Fig. 2.3 Efeito de arco considerando a relação entre $E_{\text{maciço}}$ e $E_{\text{núcleo}}$ para o estudo de (Elmi & Mirghasemi, 2013), considerando a expressão (2.3).....	8
Fig. 2.4 Efeito de arco considerando a variação da inclinação dos taludes do núcleo para o estudo de Talebi et al. (2013) .....	10
Fig. 2.5 Efeito de arco considerando a variação da inclinação dos taludes do núcleo para o estudo de Ghafari et al. (2015) .....	10
Fig. 3.1 Geometria do problema.....	17
Fig. 3.2 Malha de elementos finitos utilizada no programa Plaxis.....	18
Fig. 3.3 Pontos adoptados para a análise de deslocamentos da barragem.....	21
Fig. 3.4 Deslocamentos verticais ao longo da altura da barragem considerando saturação e não saturação do problema.....	22
Fig. 3.5 Secção definida para o estudo das tensões verticais do problema .....	22
Fig. 3.6 Tensões verticais totais ao longo da altura da barragem considerando saturação e não saturação.....	23
Fig. 3.7 Tensões verticais efectivas ao longo da altura da barragem considerando saturação e não saturação.....	24
Fig. 3.8 Factor de Segurança correspondente à fase de construção analisada.....	26
Fig. 3.9 Factor de segurança durante as fases de construção da barragem.....	26
Fig. 3.10 Distribuição de tensões verticais totais no corpo da barragem .....	27
Fig. 3.11 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem (considerem-se como negativas as tensões de compressão).....	28
Fig. 3.12 Tensões verticais totais numa secção a 15 metros de altura da barragem.....	28
Fig. 3.13 Tensões verticais totais ao longo da barragem numa secção de altura igual a 15 metros.....	29
Fig. 3.14 Cenário 1 de estudo para o efeito de arco .....	30
Fig. 3.15 Cenário 2 de estudo para o efeito de arco .....	30

Fig. 3.16 Comparação das tensões verticais totais e das tensões verticais teóricas em função da altura da barragem para os cenários 1 e 2.....	31
Fig. 3.17 Cenário 3 de estudo para o efeito de arco .....	32
Fig. 3.18 Índice de arco em função da altura da barragem para os vários cenários .....	32
Fig. 3.19 Efeito de arco ao longo do eixo horizontal da barragem para uma altura de 15 metros .....	33
Fig. 4.1 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para a relação $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=8$ .....	36
Fig. 4.2 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para a relação $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=10$ .....	36
Fig. 4.3 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para a relação $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=12$ .....	36
Fig. 4.4 Comparação das tensões verticais totais e das tensões verticais teóricas em função da altura da barragem para as diferentes relações $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$ .....	37
Fig. 4.5 Tensões verticais totais ao longo da barragem numa secção de altura igual a 15 metros para as diferentes relações $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$ .....	38
Fig. 4.6 Índice de arco em função da relação $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$ .....	38
Fig. 4.7 Efeito de arco ao longo do eixo horizontal da barragem para uma altura de 15 metros para as diferentes relações $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$ .....	39
Fig. 4.8 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso base: $\phi'_{\text{núcleo}}=28^\circ$ e $\phi'_{\text{maciço}}=30^\circ$ .....	42
Fig. 4.9 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso $\phi'_{\text{núcleo}}=28^\circ$ e $\phi'_{\text{maciço}}=35^\circ$ .....	42
Fig. 4.10 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso $\phi'_{\text{núcleo}}=28^\circ$ e $\phi'_{\text{maciço}}=40^\circ$ .....	42
Fig. 4.11 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso $\phi'_{\text{núcleo}}=15^\circ$ e $\phi'_{\text{maciço}}=30^\circ$ .....	43
Fig. 4.12 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso $\phi'_{\text{núcleo}}=20^\circ$ e $\phi'_{\text{maciço}}=30^\circ$ .....	43
Fig. 4.13 Comparação das tensões verticais totais e das tensões verticais teóricas em função da altura da barragem para o estudo da influência de $\phi'$ .....	44
Fig. 4.14 Tensões verticais totais ao longo da barragem numa secção de altura igual a 15 metros em função de $\phi'$ .....	45
Fig. 4.15 Efeito de arco em função de $\phi'$ .....	45
Fig. 4.16 Efeito de arco ao longo do eixo horizontal da barragem para uma altura de 15 metros para $\phi'$ .....	46

Fig. 4.17 Geometria dos casos analisados para a influência da inclinação do núcleo.....	47
Fig. 4.18 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso base .....	48
Fig. 4.19 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso 6V:1H.....	48
Fig. 4.20 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso 4V:1H.....	48
Fig. 4.21 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso 1V:1H.....	48
Fig. 4.22 Comparação das tensões verticais totais e das tensões verticais teóricas em função da altura da barragem para o estudo da influência da inclinação do núcleo .....	49
Fig. 4.23 Tensões verticais totais ao longo da barragem numa secção de altura igual a 15 metros em função da inclinação do núcleo. ....	50
Fig. 4.24 Índice de arco em função da inclinação do núcleo.....	51
Fig. 4.25 Efeito de arco ao longo do eixo horizontal da barragem para uma altura de 15 metros para a influência da inclinação do núcleo .....	52
Fig. 4.26 Contorno de distribuição de tensões verticais totais para uma altura de 40 metros .....	53
Fig. 4.27 Contorno de distribuição de tensões verticais totais para uma altura de 20 metros .....	53
Fig. 4.28 Comparação das tensões verticais totais e das tensões verticais teóricas em função de uma altura dimensional .....	54
Fig. 4.29 Tensões verticais totais ao longo da barragem numa secção de altura igual a 37.5% da altura total das barragens. ....	55
Fig. 4.30 Índice de arco em função de uma altura adimensional .....	56
Fig. 4.31 Índice de arco ao longo da barragem para uma altura adimensional .....	56
Fig. 4.32 índice de arco $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$ vs $\phi'$ .....	57
Fig. 4.33 Índice de arco $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$ vs inclinação do núcleo .....	58
Fig. 4.34 Índice de arco: $\phi'$ vs inclinação dos taludes do núcleo.....	59





# Índice de tabelas

Tabela 2.1 Resumo dos valores obtidos para os estudos referentes à relação $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$ .....	8
Tabela 2.2 Resumo dos valores obtidos para os estudos referentes à inclinação dos taludes do núcleo11	
Tabela 2.3 Resumo dos parâmetros estudados pelos autores da bibliografia.....	13
Tabela 3.1 Parâmetros dos solos. ....	17
Tabela 4.1 Valores adoptados para o estudo paramétrico .....	35
Tabela 4.2 Resumo dos valores obtidos para a relação $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$ .....	40
Tabela 4.3 Comparação de valores entre os casos base considerados e as alterações para a influência da relação $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$ .....	40
Tabela 4.4 Resumo dos valores obtidos para as várias inclinações do núcleo.....	52
Tabela 4.5valores médios de índice de arco para $\phi'$ e inclinação dos taludes do núcleo.....	59



# Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

$\gamma$	Peso Volúmico do solo
$\gamma_{\text{sat}}$	Peso Volúmico do solo saturado
$\gamma H$	Tensão vertical teórica
$\sigma_v$	Tensão total vertical
$\sigma'_v$	Tensão efectiva vertical
$k_v$	Coefficiente de permeabilidade vertical
$k_h$	Coefficiente de permeabilidade horizontal
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$E_{\text{ref}}$	Módulo de Elasticidade de referência
$c'$	Coesão efectiva do solo
$H$	Altura da barragem
$FS$	Factor de Segurança
$a_r$	Índice de arco
$A_r$	Efeito de arco
$\tau$	Tensão de Corte máxima
$\tau_r$	Tensão de Corte necessária para garantir o equilíbrio
$u$	Pressão Intersticial
$S$	Grau de Saturação
$E$	Módulo de deformabilidade
$E_{\text{maciço}}$	Módulo de deformabilidade dos maciços estabilizadores
$E_{\text{núcleo}}$	Módulo de deformabilidade do núcleo
$\phi'$	Ângulo de resistência ao corte
$\phi'_{\text{maciço}}$	Ângulo de resistência ao corte dos maciços estabilizadores
$\phi'_{\text{núcleo}}$	Ângulo de resistência ao corte do núcleo



# 1 Introdução

## 1.1 Considerações gerais

As barragens de aterro, tal como o próprio nome indica, são barragens constituídas por materiais naturais granulares ou argilosos, podendo ser classificadas como barragens de terra, barragens de enrocamento e ainda barragens de terra-enrocamento. Relativamente a questões de segurança, as barragens apresentam essencialmente três fases críticas: construção, primeiro enchimento e esvaziamento rápido. Para a construção destas barragens, além de um correto faseamento construtivo, é importante ter em conta as normas do Regulamento de Segurança de Barragens (RSB, 2018) no que toca à garantia de estabilidade das mesmas e não apenas relativamente à solução estrutural, como satisfazer os requisitos de segurança e funcionalidade, com adequada durabilidade e suficiente robustez. Assim, devem ser verificados os estados limite relativamente a deformações no corpo da barragem que levem à perda de aptidão para a utilização tais como assentamentos excessivos ou fissuras e, movimentos excessivos no terreno de fundação devidos a consolidação hidrodinâmica, fluência, colapso do terreno, deformações distorcionais, vibrações ou empolamento (RSB, 2018).

O efeito de arco é um fenómeno descrito pela transmissão de tensões dos solos com características mais deformáveis, para os solos que apresentem maior rigidez e que surge associado não apenas à fase de construção de uma barragem como ao seu primeiro enchimento e respetiva fase de exploração. A combinação deste efeito, em que existe um excesso de tensões transferidas, com o decréscimo de tensões efetivas durante o armazenamento de água pode levar à fratura hidráulica, com o aparecimento de fraturas que podem propagar-se pelo material do núcleo, provocando a erosão do material do mesmo e o significativo aumento de pressões intersticiais internas.

Desta forma, e para que se possa garantir a segurança da barragem em todo o seu período de vida útil, torna-se óbvia a necessidade de estudar o efeito de arco esperado numa barragem de terra. Até à presente data, a maior parte dos estudos desenvolvidos abordam barragens de enrocamento, existindo também alguns estudos relativamente a barragens de terra. Nesta dissertação será estudado o fenómeno do efeito de arco aplicado a uma barragem de terra zonada durante a fase de construção.

## 1.2 Objetivo e organização da dissertação

O objetivo desta dissertação consiste num estudo paramétrico dos fatores que influenciam o efeito de arco numa barragem de terra zonada, recorrendo, para isso ao programa de cálculo automático Plaxis.

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos sendo que o primeiro é a presente introdução.

O capítulo dois consiste num estudo bibliográfico onde se apresenta o conceito do efeito de arco e é feita uma análise dos estudos existentes onde se comparam os trabalhos desenvolvidos por vários autores por forma a aferir quais os parâmetros que podem ter maior influência neste estudo.

No capítulo três procede-se à modelação de um caso base, com o objetivo de aferir o comportamento do programa Plaxis. Apresenta-se um estudo do tempo de construção a definir para a barragem tendo em conta os deslocamentos e tensões desenvolvidas durante todo o processo de construção da mesma, considerando ainda diferentes tempos de construção e estados de saturação dos materiais. Por fim, para o caso base definido é feito um estudo do efeito de arco na estrutura, com o correspondente tratamento dos resultados obtidos.

O capítulo quatro consiste numa análise paramétrica aos fatores geométricos e propriedades mecânicas do solo que influenciam o efeito de arco em barragens de terra. A escolha destes parâmetros teve por base a análise realizada no capítulo dois.

No capítulo cinco apresentam-se as principais conclusões retiradas após a realização do presente estudo e propõem-se algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

## 2 Análise bibliográfica

### 2.1 Generalidades

Trabalhos desenvolvidos por diferentes autores consideraram que o estudo do efeito de arco de uma barragem de aterro durante a construção, primeiro enchimento da barragem e fase de exploração é igualmente importante pois pode colocar em risco a estabilidade da barragem. De um modo geral, os autores destes estudos chegaram à conclusão de que para todas as fases, o efeito de arco é maior numa altura correspondente a cerca de metade da altura da barragem e este nível é coincidente com a altura onde ocorre o maior deslocamento da estrutura.

Este capítulo tem por objetivo definir e explicar o fenómeno do efeito de arco em barragens de terra com perfil zonado, durante a fase de construção da barragem e analisar trabalhos desenvolvidos por outros autores que consideram este efeito em barragens de terra ou enrocamento. Para o efeito, começa-se por definir o efeito de arco e abordar as diferentes definições de índice de arco encontradas na bibliografia. O índice de arco tem por objetivo quantificar o efeito de arco e resulta de uma comparação entre tensões verticais. Posteriormente, analisam-se os estudos realizados pelos autores tendo em conta os vários parâmetros estudados e qual a influência destes no efeito de arco. Apesar dos estudos existentes apresentarem barragens com características geométricas, materiais e propriedades muito diversas, procurou-se comparar alguns dos resultados obtidos pelos autores.

Este foi um processo complicado pois além dos diversos autores analisarem barragens compostas por diferentes materiais e propriedades geométricas, o que influenciou os resultados obtidos, para análise deste efeito não consideraram as mesmas relações numéricas, nem as tensões foram obtidas nas mesmas secções.

### 2.2 Efeito de Arco

Uma definição geral do efeito de arco pode ser dada como a transferência de tensões de uma massa de solo para as adjacentes, causada por diferenças de deslocamentos entre massas de solo adjacentes. Os exemplos mais comuns onde ocorre este efeito são túneis, barragens de terra e paredes de contenção.

Terzaghi (1943) descreveu este efeito como se uma parte da massa de solo plastificasse enquanto a outra se move da sua posição inicial entre as massas de solo adjacentes. A resistência ao corte tende a manter a parte que plastifica na sua posição original, reduzindo a pressão na zona plastificada de suporte e aumentando as pressões desenvolvidas nas zonas

estacionárias adjacentes. A esta transferência de tensões da zona plastificada para as zonas adjacentes o autor chamou de efeito de arco.

Este é um fenómeno que pode ser observado em todos os tipos de formações de solo onde seja possível deformação por corte, deformação plástica e rotura de algumas partes do solo. Pode começar por deformação por corte e ir até a uma deformação permanente (deformação plástica), até que algumas partes do solo entrem em rotura.

Em barragens zonadas, as diferenças de rigidez entre os vários materiais utilizados no núcleo e na constituição do corpo da barragem provocam assentamentos distintos entre os mesmos. Esse diferencial de assentamentos é responsável pela transferência de carga pois a parte com maiores deslocamentos verticais transfere parte do seu peso para a outra. Esta é uma transferência que ocorre do núcleo - material mais argiloso - para o maciço, um material com maior rigidez. À transferência de tensões do núcleo para o maciço dá-se o nome de efeito de arco. Esta provoca uma consequente diminuição das tensões verticais e laterais no núcleo, podendo originar fraturas horizontais Ormaz e Vataein (2004) levando a sérios problemas de erosão e significativas pressões intersticiais internas.

A título de exemplo ilustrativo do efeito de arco, apresenta-se a Fig. 2.1. que representa as tensões médias totais na barragem de aterro estudada por Talebi et al. (2013) ao longo do eixo horizontal da barragem.

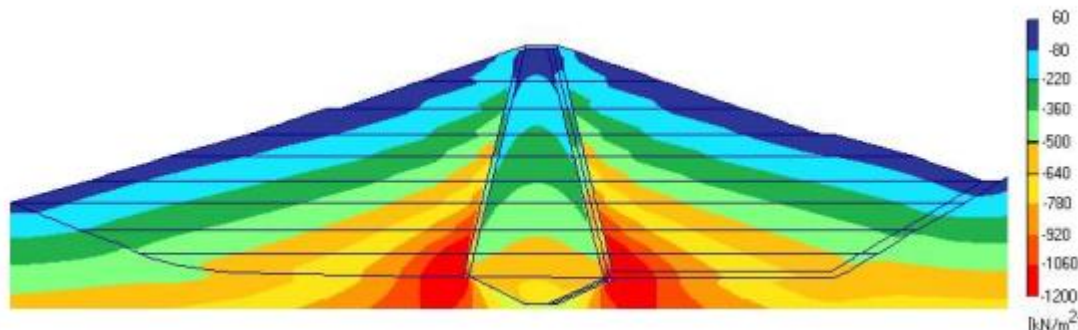


Fig. 2.1 Tensões médias totais numa barragem de aterro no final da construção (as tensões de compressão apresentam-se negativas) (Talebi et al. 2013)

As cores mostram que as tensões no núcleo são inferiores às tensões existentes nos maciços estabilizadores da barragem, pelo que nesta situação torna-se clara a existência de efeito de arco. Por exemplo, a meio da barragem, no núcleo, as tensões representadas a verde assumem um valor na ordem dos 360kPa, enquanto que, no maciço, estas tensões situam-se um pouco mais acima na barragem e nesta zona se observam tensões na ordem dos 640kPa.

O efeito de arco ocorre principalmente durante a fase de construção da barragem. Durante a exploração da mesma, a água armazenada flui através do núcleo e as tensões efetivas diminuem e geram-se pressões intersticiais muito próximas de zero ou negativas. A combinação destes dois fenómenos pode levar à fratura hidráulica, pois as fissuras horizontais permitem a



infiltração interna de água que pode erodir o material e progressivamente levar a uma falha global da estrutura.

Como referido anteriormente, foram encontradas na bibliografia diferentes expressões que procuram quantificar o efeito de arco. Todas elas definem este fenómeno em termos de tensões totais, adotando um índice de arco,  $a_r$ , definindo-o como:

$$a_{r1} = \frac{\gamma H - \sigma_v}{\sigma_v}; \quad (2.1)$$

$$a_{r2} = \frac{\gamma H - \sigma_v}{\gamma H}; \quad (2.2)$$

$$a_{r3} = \frac{\sigma_v}{\gamma H}; \quad (2.3)$$

onde  $\gamma H$  representa a tensão vertical total teórica na barragem, ou seja, o produto entre o peso volumico do material e a profundidade medida entre o coroamento da barragem e o ponto pretendido, e  $\sigma_v$  representa a tensão vertical medida nesse mesmo ponto. Todas elas têm em comum o facto de compararem tensões verticais totais entre si, sendo que podem ser interpretadas de forma diferente.

A expressão (2.1) é utilizada por Ghafari et al. (2015) e Maksimovic (1973)e, neste caso, admite-se que não existe efeito de arco quando  $a_r=0$ , ou seja, quando as tensões verticais teóricas são iguais às tensões verticais totais existentes, não tendo um limite máximo.

A expressão (2.2) está presente nos estudos de Dantas & Júnior (2016), Talebi et al. (2013) e Sharma (1991) e neste caso, também o efeito de arco não existe quando  $a_r=0$  e atinge o seu valor máximo quando  $a_r=1$ .

A expressão (2.3) é utilizada por Dantas & Júnior (2016), Esmailzadeh et al. (2017), Nayeibzadeh & Mohammadi(2011) e Elmi & Mirghasemi (2013). Neste caso, não se verifica a existência de efeito de arco para  $a_r=1$ e, quanto mais se afasta deste valor para valores próximos de zero, maior será o efeito de arco na estrutura.

O presente trabalho tem em conta a expressão (2.3), pois esta faz uma comparação direta entre as tensões verticais totais e as tensões verticais teóricas, assumindo que quando ambas tomam o mesmo valor,  $a_r=1$  e não existe efeito de arco. Esta é uma expressão mais simples que indica que, quanto menor o valor das tensões verticais existentes relativamente às tensões teóricas, maior será o efeito de arco.

## 2.3. Trabalhos desenvolvidos

### 2.3.1 Conhecimentos gerais

O efeito de arco e a sua importância na análise de estabilidade de barragens foi abordada pela primeira vez por Lofquist (1955). Através do uso de instrumentos, percebeu que existe um grande declínio de tensões verticais e laterais no núcleo da barragem. O autor mostrou ainda que também existe uma relação entre o diferencial de assentamento do núcleo para o maciço e o decréscimo de tensões no núcleo das barragens de aterro.

Mais tarde, e de acordo com a literatura, pensa-se que os primeiros estudos recorrendo à análise por métodos de elementos finitos (FEM) surgiram em 1973 por Maksimovic. Este assumiu o comportamento dos materiais constituintes da barragem como elástico e a construção da barragem como tendo sido executada de uma só vez. Analisou a influência de diferentes módulos de deformabilidade do núcleo e do maciço e diferentes inclinações dos taludes do núcleo.

Ao longo dos anos vários, autores abordam este tema por forma a estudar não só o efeito de arco existente em barragens de terra como também os principais parâmetros geométricos ou mecânicos que influenciam este efeito. De seguida procede-se à análise de alguns destes estudos paramétricos.

### 2.3.2 Influência da relação entre a deformabilidade dos maciços estabilizadores e do núcleo

A influência da relação entre o módulo de deformabilidade dos maciços da barragem de aterro e o módulo de deformabilidade do núcleo foi estudada em trabalhos desenvolvidos por autores como Talebi et al. (2013) e Elmi & Mirghasemi (2013). Nestes estudos, os autores mantêm constante o valor do módulo de deformabilidade do núcleo e aumentam o módulo de deformabilidade do maciço, obtendo-se assim resultados da variação do efeito de arco com diferentes relações  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$ .

A Fig. 2.2 mostra o efeito de arco existente numa barragem de enrocamento, com 102 metros de altura, estudada por Talebi et al (2013), em função da profundidade a partir do coroamento da barragem, quando se aumenta o valor de  $E$  para o maciço, mantendo o valor de  $E_{\text{núcleo}}$  constante. Daqui, obtêm-se as relações de estudo  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=8, 10$  e  $12$ . Para o estudo deste efeito de arco foi traçada uma secção na fronteira entre o núcleo e o material de transição por forma a medir as tensões verticais totais. Para quantificar o efeito de arco, o autor utiliza a expressão (2.2). Lembra-se que a utilização desta expressão implica a ausência de efeito de arco quando o índice de arco,  $a_r$ , é igual a zero.

A Fig. 2.3 descreve o efeito de arco ao longo da altura de uma barragem de terra, com 128 metros de altura, estudada por Elmi & Mirghasemi (2013), para as relações  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=1, 2, 5, 7.5$  e 10. Neste estudo o efeito de arco foi calculado utilizando a expressão (2.3) em que se relembra o efeito de arco é inexistente quando  $a_r$  toma valores iguais à unidade. Refira-se ainda que para este estudo, o autor fez o levantamento de tensões verticais na linha central do núcleo da barragem.

Para melhor compreensão das Fig. 2.2 e Fig. 2.3 adicionou-se uma seta que representa o sentido crescente do efeito de arco.

Por forma a comparar os valores obtidos por ambos os autores consideram-se as relações  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=8$  e 10 para Talebi et al (2013) e  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=7.5$  e 10 para Elmi & Mirghasemi (2013).

Em ambas as figuras escolheram-se para exemplificar os valores máximos do efeito de arco observados entre 1/3 e 2/3 da altura total da barragem. No caso de Talebi et al. (2013) retiraram-se valores a 40 metros de profundidade, como se observa na Fig. 2.2, obtendo-se  $a_r=0,8$  para  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=8$  e  $a_r=0,83$  para  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=10$ . Substituindo estes valores na expressão (2.2), obtém-se respectivamente  $\sigma_v/\gamma H=0.5$  e  $\sigma_v/\gamma H=0.55$ . No caso de (Elmi & Mirghasemi, 2013), para uma altura de 80 metros (referida na Fig. 2.3 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**), tiram-se os valores de  $a_r=0.55$  para  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=7.5$  e de  $a_r=0.5$  para  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=10$ . Neste caso, os valores são directos, pois a expressão utilizada foi a (2.3).

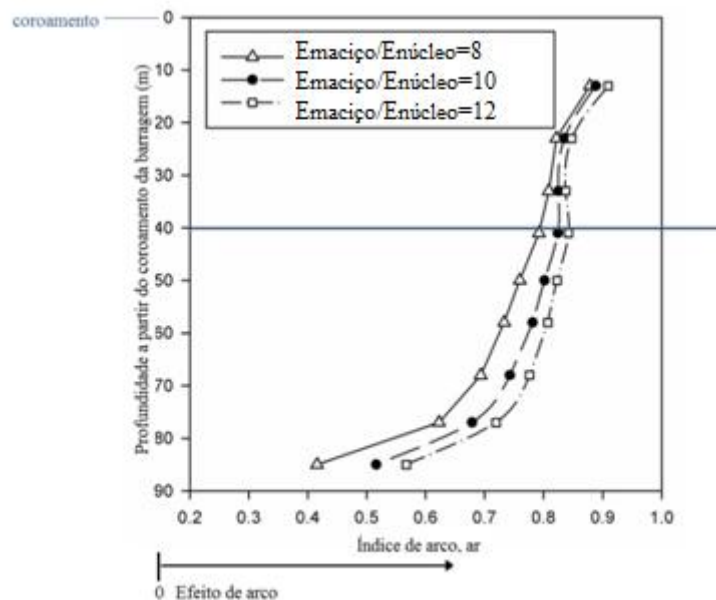


Fig. 2.2 Efeito de arco considerando a relação entre  $E_{\text{maciço}}$  e  $E_{\text{núcleo}}$  para o estudo de Talebi et al. (2013) considerando a expressão (2.2)

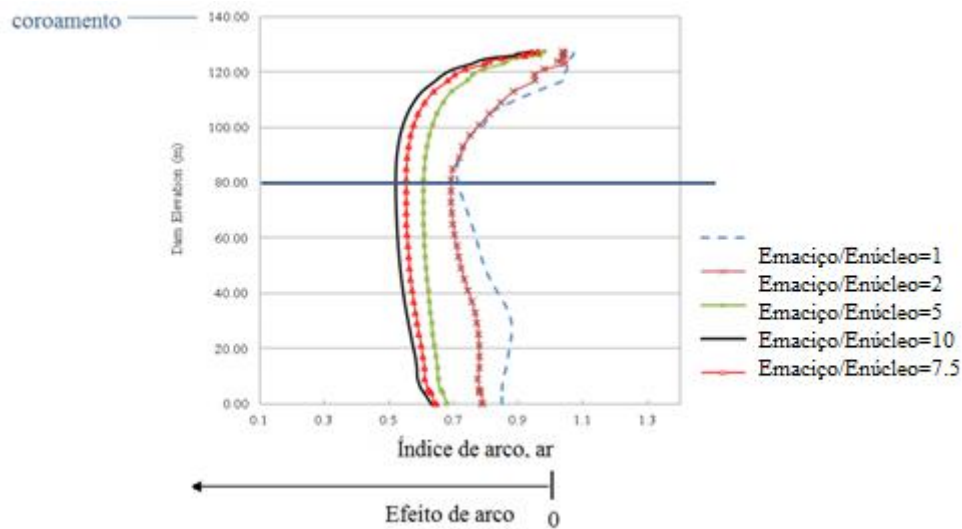


Fig. 2.3 Efeito de arco considerando a relação entre  $E_{macço}$  e  $E_{núcleo}$  para o estudo de (Elmi & Mirghasemi, 2013), considerando a expressão (2.3)

Na Tabela 2.1 Resumo dos valores obtidos para os estudos referentes à relação  $E_{macço}/E_{núcleo}$ , apresenta-se um resumo dos valores obtidos para este estudo. Considerando o estudo de Talebi et al. (2013), conclui-se que as tensões verticais teóricas a 61% da altura total da barragem correspondem a 20% das tensões teóricas para o caso em que  $E_{macço}/E_{núcleo}=8$  e a 17% das tensões teóricas quando  $E_{macço}/E_{núcleo}=10$ . No caso de (Elmi & Mirghasemi, 2013), para 62.5% da altura total da barragem tem-se que as tensões verticais totais representam 55% das teóricas para o caso em que  $E_{macço}/E_{núcleo}=7.5$  e, para a relação  $E_{macço}/E_{núcleo}=10$ , estas tensões representam 50% das teóricas.

Tabela 2.1 Resumo dos valores obtidos para os estudos referentes à relação  $E_{macço}/E_{núcleo}$ .

	$\frac{E_{macço}}{E_{núcleo}}$	$a_r$	H	% de Altura	$\frac{\sigma_v}{\gamma H}$
Talebi et al (2013)	8	0.8 (2.2)	62	61	0.2
	10	0.83 (2.2)			0.17
(Elmi & Mirghasemi, 2013)	7.5	0.55 (2.3)	80	62.5	0.55
	10	0.50 (2.3)			0.50

A barragem estudada por Talebi et al. (2013) apresenta um maior efeito de arco para uma mesma percentagem de altura, quando comparada a de (Elmi & Mirghasemi, 2013), a diferença

de valores obtidos quando considerados ambos os trabalhos deve-se não só ao facto de serem consideradas secções diferentes de análise e diferentes propriedades dos materiais, mas também ao facto de num caso se tratar de uma barragem de terra e no outro de uma barragem de enrocamento situação em que o efeito de arco se espera sempre maior, pois os deslocamentos verticais nestes materiais são maiores.

Por observação das Fig. 2.2 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** e Fig. 2.3 conclui-se que quanto maior esta relação entre a deformabilidade dos maciços e do núcleo, maior o efeito de arco. Ambos demonstram que existe uma relação directa entre estes parâmetros e a transferência de carga do núcleo para o maciço. Quanto maior for este rácio, menores as tensões existentes no núcleo e maiores são as tensões que são transferidas para o maciço.

### **2.3.3 Influência da inclinação dos taludes do núcleo**

A influência da inclinação do núcleo fez parte dos estudos elaborados por Ghafari et al. (2015) e Talebi et al. (2013). Para os estudos da variação deste parâmetro geométrico os autores mantêm sempre constante a largura de coroamento da barragem, alterando apenas a inclinação dos taludes do núcleo da barragem.

A Fig. 2.4 representa o efeito de arco ao longo da altura da barragem estudada por Talebi et al. (2013). Como se refere em 2.3.2 esta é uma barragem com 102 metros de altura e a secção de estudo das tensões verticais foi uma secção na fronteira entre o núcleo e o material de transição. Para o presente caso os autores estudaram três diferentes inclinações: 2V:1H, 3V:1H e 4V:1H.

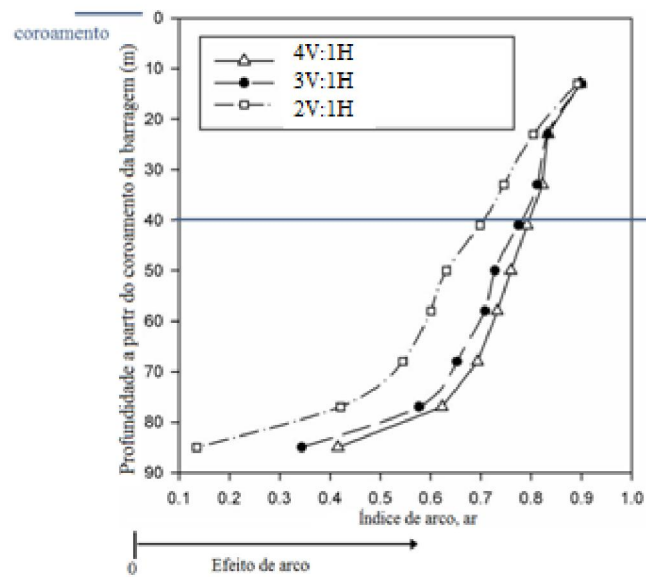


Fig. 2.4 Efeito de arco considerando a variação da inclinação dos taludes do núcleo para o estudo de Talebiet al. (2013)

A Fig. 2.5 apresenta o efeito de arco numa barragem de enrocamento com 120 metros de altura ao longo da altura da barragem. Neste caso os autores analisaram, para estudo das tensões verticais, uma secção na linha central do núcleo e a expressão utilizada para quantificar este efeito é a referida em (2.1). Relembre-se que para este índice de arco, o efeito de arco é nulo quando  $a_r=0$ . Este estudo foi feito tendo em conta cinco inclinações diferentes: 2.5V:1H, 3V:1H, 4V:1H, 5V:1H e 6V:1H.

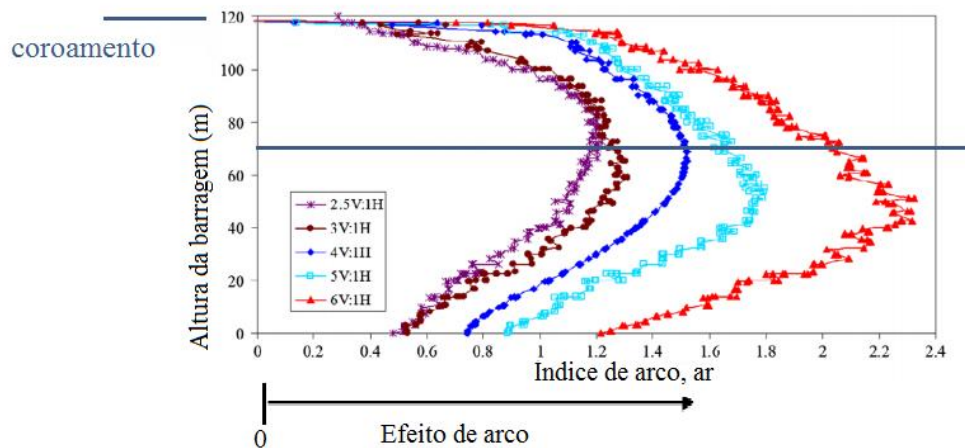


Fig. 2.5 Efeito de arco considerando a variação da inclinação dos taludes do núcleo para o estudo de Ghafariet al. (2015)

Os estudos acima apresentados têm em comum as inclinações de 4V:1H e 3V:1H pelo que estas serão alvo de maior análise. Para o caso em que a inclinação estudada é de 4V:1H Talebi et al. (2013) obtém um valor máximo para o índice de arco, a uma altura de 62 metros, de 0.8, e para a inclinação de 3V:1H  $a_r=0.77$ . À semelhança do que foi feito anteriormente, substituindo estes valores em (2.2) tem-se:  $\sigma_v/\gamma H=0.23$  e  $\sigma_v/\gamma H=0.2$ . Considerando o estudo de Ghafari et al. (2015), este apresenta a uma altura de 70 metros  $a_r=1.5$ , para a inclinação de 4V:1H,  $a_r=1.68$  para 3V:1H.

Na Tabela 2.2 apresenta-se um resumo dos valores obtidos para este estudo, de onde se conclui que para 61% da altura total da barragem de Talebi et al (2013), as tensões verticais totais representam 23% das tensões teóricas para a inclinação de 3V:1H e 20% quando considerada uma inclinação de 4V:1H. No caso de Ghafari et al. (2015), obtém-se que para uma altura referente a 58% da altura total as tensões verticais representam 40% e 37% das tensões teóricas para as inclinações de 3V:1H e 4V:1H.

Tabela 2.2 Resumo dos valores obtidos para os estudos referentes à inclinação dos taludes do núcleo

	Inclinação	$a_r$	H	% de Altura	$\frac{\sigma_v}{\gamma H}$
<b>Talebi et al.</b>	3V:1H	0.77 (2.2)	62	61	0.23
	4V:1H	0.8 (2.2)			0.2
<b>Ghafari</b>	3V:1H	1.5 (2.1)	70	58	0.4
	4V:1H	1.68 (2.1)			0.37

Estes estudos mostram que a barragem de Talebi et al. (2013) apresenta, para a mesma percentagem de altura, um efeito de arco superior ao que se observa na barragem estudada por Ghafari et al. (2015). Estas diferenças devem-se mais uma vez ao facto de não se considerarem os mesmos materiais e, tendo ainda maior relevo neste caso, o facto de o primeiro autor considerar as tensões verticais junto ao material de transição e o segundo fazer esta leitura ao longo da linha central do núcleo. De fato, as tensões na linha central do núcleo são a zona onde se atingem os valores máximos para as tensões no núcleo da barragem, traduzindo efeitos de arco menores.

A Fig. 2.4 mostra ainda que não existe uma grande diferença em considerar uma inclinação de 3V:1H ou 4V:1H para o caso estudado, mas nota-se uma diferença de cerca de 0.2 quando considerado o caso em que a inclinação do talude do núcleo é de 2V:1H. Conclui-se que o efeito de arco também aumenta com a altura da barragem, pois para alturas maiores verifica-se um maior efeito de arco.

Quanto ao gráfico apresentado na Fig. 2.5, o valor máximo atingindo acontece para o caso em que se analisa o núcleo mais vertical de todos, 6V:1H. Os casos em que se consideram inclinações de 1V:1H e 2,5V:1H não apresentam grandes diferenças entre si. À semelhança do que conclui Talebi et al. (2013), o efeito de arco é maior quando considerados núcleos mais verticais.

Destes dois estudos conclui-se que a forma do núcleo tem uma grande influência no efeito de arco de uma barragem, quanto mais vertical for o núcleo desta, maior o efeito de arco na estrutura.

### **2.3.4 Influência do ângulo de resistência ao corte**

A resistência ao corte é controlada pelas tensões efectivas pelo que se torna um parâmetro interessante a estudar uma vez que o efeito de arco se faz sentir com a variação do estado de tensão da estrutura. Esmailzadeh et al. (2017) e (Elmi & Mirghasemi, 2013) estudaram a influência deste parâmetro no efeito de arco.

Esmailzadeh et al. (2017) optaram por estudar a relação existente entre o ângulo de resistência ao corte do material do núcleo e o ângulo de resistência ao corte do material do maciço. Numa primeira fase manteve o valor do ângulo de resistência ao corte do maciço constante e alterou  $\phi'$  do filtro para posteriormente alterar o  $\phi'$  do núcleo mantendo constante o do filtro, concluindo que quanto maior o  $\phi'$  do núcleo, menor o efeito de arco e, que quando se aumenta o  $\phi'$  do filtro o índice de arco também aumenta.

Elmi & Mirghasemi (2013), elaboraram este estudo alterando o ângulo de resistência ao corte da vala corta-águas para os valores de 15°, 10°, 5° e 0°. Este parâmetro influencia o efeito de arco pois altera as tensões verticais totais da estrutura uma vez que se torna a vala corta-águas um elemento mais deformável que a fundação. Conclui que embora o estado de tensão no núcleo seja maioritariamente controlado pela sua resistência não drenada, o estudo do ângulo de resistência ao corte é também relevante para o efeito de arco.

### **2.3.5 Outros parâmetros**

Registaram-se ainda outros estudos relativamente a parâmetros que possam influenciar o efeito de arco. Destes destacam-se a variação das inclinações dos taludes de montante e jusante da barragem, estudado por Talebi et al. (2013), este parâmetro não afeta diretamente o efeito de arco, embora taludes mais horizontais possam sustentar melhor as tensões verticais geradas e reduzir a possibilidade de fraturação hidráulica.

A espessura dos filtros foi um dos parâmetros analisados também nos estudos de Talebi et al. (2013). Este é importante pois os filtros não só controlam os escoamentos através do corpo da



barragem e da sua fundação, garantindo a retenção dos materiais adjacentes, como funcionam também como transição de um material para outro. Estudaram-se três espessuras diferentes, 2, 4 e 6 metros, concluindo que quanto maior a espessura do filtro, menor o efeito de arco na estrutura. Isto deve-se a esta zona de transição impedir que a diferença de rigidez entre o núcleo e o maciço seja tão grande o que faz com que a transferência de tensões atinja menores valores.

Refere-se ainda que Esmailzadeh et al. (2017) estudaram a influência do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) no filtro e no núcleo da estrutura, concluindo que quanto maior o valor de  $\nu$  no núcleo menor o efeito de arco observado.

Por fim, Talebi et al (2013) estudaram a influência da compressibilidade da fundação ao alterar os valores do módulo de deformabilidade desta, quanto maior o valor de  $E_{\text{fundação}}$ , menos compressível se considera a fundação, ainda assim a alteração destes valores não introduziu diferenças no efeito de arco da estrutura, pelo que se considera que este parâmetro não tem influência.

### 2.3.6 Resumo dos autores analisados

Dos estudos analisados concluem-se como mais relevantes a influência do módulo de deformabilidade do maciço e núcleo, as inclinações dos taludes a montante a jusante do núcleo e o ângulo de resistência ao corte. Outros parâmetros analisados, quando comparados com estes não revelaram uma influência significativa. De seguida apresenta-se na Tabela 2.3 um resumo dos parâmetros estudados e referidos anteriormente, considerando os seus autores e as expressões utilizadas para quantificar o efeito de arco.

Tabela 2.3 Resumo dos parâmetros estudados pelos autores da bibliografia

Bibliografia	Material	Secção estudada	$a_r$	Parâmetros
(Ghafari, Nikraz, & Sanaeirad, 2015)	Enrocamento	No centro do núcleo	$\frac{\gamma H - \sigma_v}{\sigma_v}$	$E_{\text{filtro}}$ ( $E=14, 21, 30, 40$ e $70$ MPa); Inclinação dos taludes núcleo (2,5V:1H, 3V:1H, 4V:1H, 5V:1H e 6V:1H;
(Talebi, Vahedifard, & Meehan, 2013)	Enrocamento	Junto ao material de transição	$\frac{\gamma H - \sigma_v}{\gamma H}$	Inclinação dos taludes do maciço (1V:0,25H, 1V:0,33H, 1V:0,55H); $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$ (8, 10 e 12); Inclinação dos taludes do núcleo (1V:1H, 1V:0.5H, 1V:0.25H) Espessura do Filtro (2,4 e 6 metros)

				Compressibilidade da fundação
(Elmi & Mirghasemi, 2013)	Terra	No centro do núcleo	$\frac{\sigma_v}{\gamma H}$	$\phi'$ vala corta-águas (15°, 10°, 5° e 0°);
				proporção da vala para o núcleo (1/2, 1/5, 1/10, 1/20, 1/35, 1/50 e 1/100);
				$E_{\text{vala}}/E_{\text{núcleo}}$ (1/2, 1/5, 1/10, 1/20, 1/35, 1/50 e 1/100);
(Esmacilzadeh, Talkhablou, & Ganjalipour, 2017)	Terra	Fronteira entre o núcleo e a fundação	$\frac{\sigma_v}{\gamma H}$	$E_{\text{núcleo}}/E_{\text{filtro}}$ (5, 4, 3, 2, 1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5);
				Coefficiente de Poisson, $\nu$ ;
				$\phi'_{\text{filtro}}/\phi'_{\text{núcleo}}$ (5, 4, 3, 2, 1, 1/2, 1/3, 1/4, 1/5);
				Inclinação dos taludes do núcleo entre 45° e 90°



## 3 Modelação de um caso base

### 3.1 Introdução

Este capítulo tem por objetivo avaliar o efeito de arco numa barragem de terra zonada durante a fase de construção. Com vista à modelação de um caso base recorreu-se ao programa de elementos finitos PLAXIS 2D, versão 2016.01. Este é um programa desenvolvido para a análise de tensão e deformação, estabilidade e percolação em estruturas geotécnicas.

Desta forma, começa-se pela definição do caso base no que toca à geometria e materiais aplicados à sua construção. Além da escolha dos materiais a utilizar, existem outros parâmetros condicionantes a este tipo de análise dos quais fazem parte o tempo de construção e o seu faseamento construtivo. Por forma a definir qual o tempo de construção da barragem, procedeu-se a um estudo das deformações e tensões do caso base definido, para diferentes estados de consolidação.

Por fim, e uma vez validado o modelo, procede-se ao estudo do efeito de arco na estrutura em termos de tensões verticais.

### 3.2 Geometria e materiais

Para a geometria do caso base considerou-se uma barragem de 40 metros de altura com um núcleo central argiloso, protegido por filtros a montante e a jusante. Os taludes da barragem apresentam uma inclinação a montante e jusante de 1V:3H, os taludes do núcleo uma inclinação de 2V:1H, a largura da crista é de 7 metros e para a profundidade da vala corta-águas adotou-se uma altura de 5 metros. No que toca à fundação, admitiu-se uma profundidade igual à altura da barragem. A geometria da barragem encontra-se esquematizada na Fig. 3.1.

Para a altura da barragem, embora nos estudos avaliados se considerem barragens com uma altura superior a 100 metros, admitiram-se 40 metros, pois esta é uma altura média considerada para as barragens existentes em Portugal.

Para a composição dos solos foram utilizados os parâmetros indicados na Tabela 3.1. Consideraram-se todos os materiais com comportamento drenado à exceção do núcleo que por ser um material pouco permeável se considerou com um comportamento não drenado. As propriedades do solo admitidas para o problema tiveram por base a barragem zonada analisada por (Almeida, 2013).

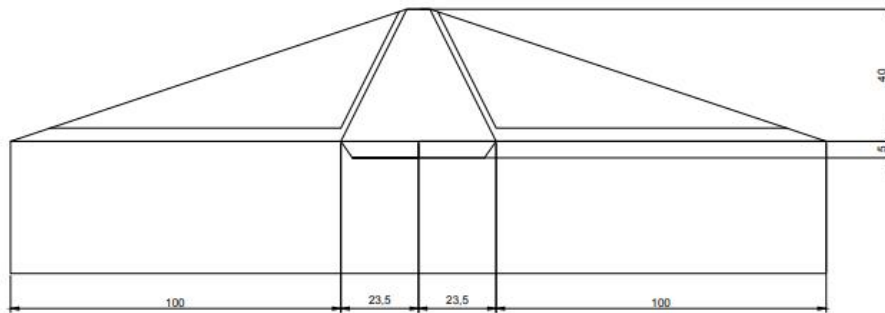


Fig. 3.1 Geometria do problema

Relativamente a estes valores efetuaram-se algumas alterações tais como o valor do módulo de deformabilidade da fundação da barragem com o objetivo de considerar a fundação como elemento rígido. Para a simulação do comportamento mecânico dos solos optou-se pelo modelo constitutivo de Mohr-Coulomb.

Quanto ao comportamento hidráulico dos solos adotou-se o modelo proposto por Van Genuchten (1980) para definir o grau de saturação dos solos com a indicação das permeabilidades vertical e horizontal do solo. Por forma a ser possível a consideração da variação do grau de saturação dos materiais que compõe a barragem e garantir que durante a fase de construção os solos se encontram não saturados, aquando da definição dos materiais, o Plaxis define nas propriedades dos materiais um parâmetro  $\Psi_{\text{unsat}}=10^4$ , partindo do princípio de que quando este parâmetro tem valor zero corresponde a uma situação de saturação máxima, em que o grau de saturação é igual a um. Admitindo um valor desta ordem de grandeza procura-se indicar que a zona não saturada é ilimitada, ou seja, os solos são infinitamente não saturados.

Definido o comportamento hidráulico dos solos, esta variação do grau de saturação traduz-se através da sucção simulada pelo programa. Ao se permitir a contabilização da sucção nos cálculos está automaticamente a variar-se a saturação do solo.

Tabela 3.1 Parâmetros dos solos.

	Fundação	Maciço	Núcleo	Filtro
$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	25	21	21	19
$\gamma_{\text{sat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	26	21,5	20	19
$k_h$ [m/s]	$9 \times 10^{-8}$	$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{-3}$
$k_v$ [m/s]	$9 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-9}$	$3 \times 10^{-3}$
$k_h/k_v$	1	5	5	1
$E_{\text{ref}}$ [MPa]	150	40	5	20
$\nu$	0,3	0,2	0,3	0,35
$c'$ [kPa]	40	0	7	1
$\Phi'$ [°]	35	30	28	35

### 3.3 Modelação numérica

#### 3.3.1 Condições de análise

O problema foi analisado em estado plano de deformação e para a malha de elementos finitos foram utilizados elementos triangulares de quinze nós. A malha do problema pode ser observada na Fig. 3.2. Para as condições de fronteira impediram-se os deslocamentos horizontais nos limites esquerdo e direito do problema e os movimentos verticais e horizontais na base da fundação foram restringidos pelos materiais adotados.

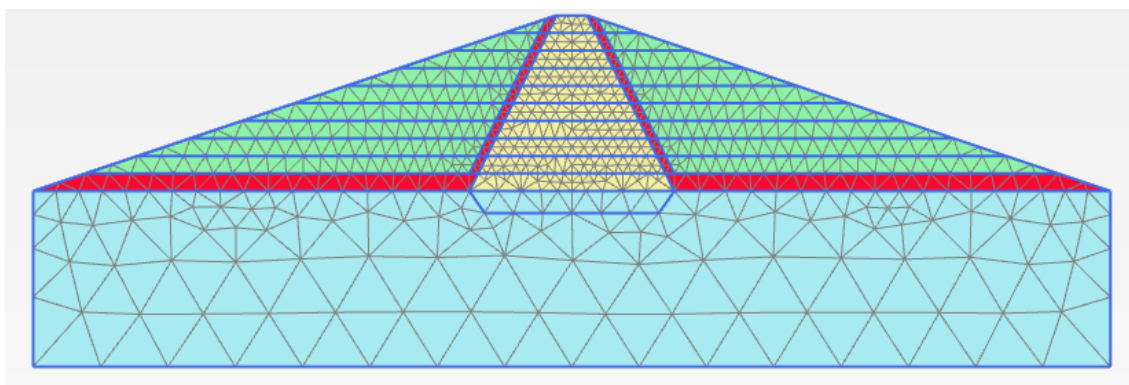


Fig. 3.2 Malha de elementos finitos utilizada no programa Plaxis

#### 3.3.2 Faseamento construtivo

O processo construtivo de aterros baseia-se numa construção camada a camada. Desta forma, as cargas a que está sujeita a estrutura vão-se acumulando gradualmente durante a fase construtiva, não resultando numa aplicação imediata de uma solicitação correspondente à estrutura total. Em métodos de elementos finitos a modelação da construção deve corresponder, tanto quanto possível, às camadas de construção do aterro.

Para a construção da barragem efectua-se primeiro a fundação da barragem, a escavação e a colocação do material da vala corta-águas e em seguida a construção das camadas de aterro. Assim, esta foi simulada considerando uma subdivisão em dez camadas de quatro metros de altura cada uma. Definiu-se a construção de cada camada recorrendo a dois tipos de cálculo disponíveis no PLAXIS: um primeiro, em que se define uma fase plástica e um segundo em que é definida uma fase de consolidação. Estas duas situações permitem que se considere apenas o peso da colocação do material correspondente à camada, no cálculo plástico e, a consideração da variação do grau de saturação do solo e do desenvolvimento de tensões e deslocamentos devidos à drenagem do solo durante o tempo de consolidação da camada. Esta decisão teve por base um estudo prévio referente aos deslocamentos ocorridos na estrutura considerando apenas

a fase plástica de construção ou ambas. Considerando apenas os deslocamentos ocorridos devido à fase plástica de construção assume-se que estes se devem apenas à colocação do material e ao seu próprio peso, enquanto que ao se considerarem ambas as fases, consideram-se os deslocamentos ocorridos devido à colocação do material e os deslocamentos ocorridos durante o tempo de consolidação. A consideração de uma fase plástica seguida de uma fase de consolidação é sempre do lado da segurança pois nos estudos prévios realizados observaram-se maiores deslocamentos.

Deste modo, a implementação do problema no Plaxis foi realizada com os seguintes passos:

Fase inicial: "*k0 procedure*", para a activação do solo de fundação e para que se gerem as tensões iniciais.

Fase 1: Remoção do terreno correspondente à vala corta-águas ("*deactivate*") definindo um cálculo "*plastic*".

Fase 2: Colocação do material do núcleo na vala corta-águas ("*activate*"), definindo também um cálculo "*plastic*".

Fase 3: Drenagem do solo ao longo de um determinado tempo com "*Consolidation*"

As fases seguintes repetem-se pelo número de vezes necessário até se concluir a construção do aterro:

Fase 4: Colocação da primeira camada de aterro ("*Plastic*")

Fase 5: Consolidação da camada anterior. ("*Consolidation*").

Fase 6: Definição de uma fase de segurança, ("*Safety*")

Relativamente ao faseamento construtivo refira-se ainda que:

- para todas as fases em que o método de cálculo adoptado foi o "*Plastic*" admite-se a colocação imediata da camada de terra e considera-se apenas o seu peso na deformação e geração de tensões da barragem;
- o tempo considerado para a fase de consolidação será objecto de estudo em 3.4;
- a fase de segurança entre cada camada e tem por objectivo a redução das propriedades de resistência dos materiais até encontrar um coeficiente de segurança mínimo; este tipo de análise será abordada em 3.5;
- e em todas as fases de construção foi seleccionada a opção "*reset displacements to zero*";

- em todas as fases deferidas como "*Plastic*" ou "*Consolidation*" foi desactivada a opção - activada por defeito pelo programa - "*ignore suction*";

### 3.4 Estudo do tempo de consolidação

#### 3.4.1 Cálculos efectuados

Neste ponto pretende-se fazer um estudo relativamente às tensões e deslocamentos desenvolvidos na estrutura quando considerados diferentes tempos de consolidação. Assim, consideraram-se tempos de 5, 10, 15 e 20 dias.

A previsão dos campos de deformação desenvolvidos durante a construção de uma barragem de terra constitui um estudo importante no seu projecto. À medida que se constrói a barragem ocorrem deslocamentos na estrutura, o diferencial de deslocamentos ocorridos entre o núcleo da barragem e o corpo provoca também um diferencial de tensões entre os dois materiais, o que irá influenciar o comportamento da barragem. Este é um processo durante o qual se desenvolvem tensões existindo uma transferência de tensões do núcleo da barragem para os maciços, originando uma redistribuição de tensões na estrutura, podendo comprometer a segurança da barragem.

Mudanças no grau de saturação de um solo afetam diretamente a permeabilidade dos solos, o que por sua vez controla a distribuição de pressões intersticiais, tendo estas influência nas tensões a que está sujeita a barragem. Desta forma, para todos os tempos referidos, foram efectuados dois cálculos, um primeiro considerando que o problema decorre em condições em que os seus materiais se encontram infinitamente não saturados e outro permitindo a variação do grau de saturação dos materiais por forma a que este seja inferior a um. Esta variação é feita pelo modelo de Van Genuchten e por se permitir ou não a variação da sucção no problema. Ao contrário de outros modelos, o modelo constitutivo adoptado para o comportamento dos solos no Plaxis, Mohr-Coloumb, é limitado no que toca à consideração de um estado de saturação dos materiais, pois não tem em conta o teor de água dos materiais.

Os deslocamentos verticais foram analisados para os diferentes tempos já indicados, no eixo central do núcleo. Desde o limite do núcleo com a fundação até ao coroamento marcaram-se 10 pontos ao longo da altura da barragem, sendo que cada ponto é marcado no meio de cada camada de construção como ilustra na Fig. 3.3.

A divisão da barragem em 10 camadas de igual altura permite estudar os deslocamentos fase a fase da construção.

Comece-se por analisar os deslocamentos ocorridos durante a construção da barragem para ambos os estados de saturação dos materiais.



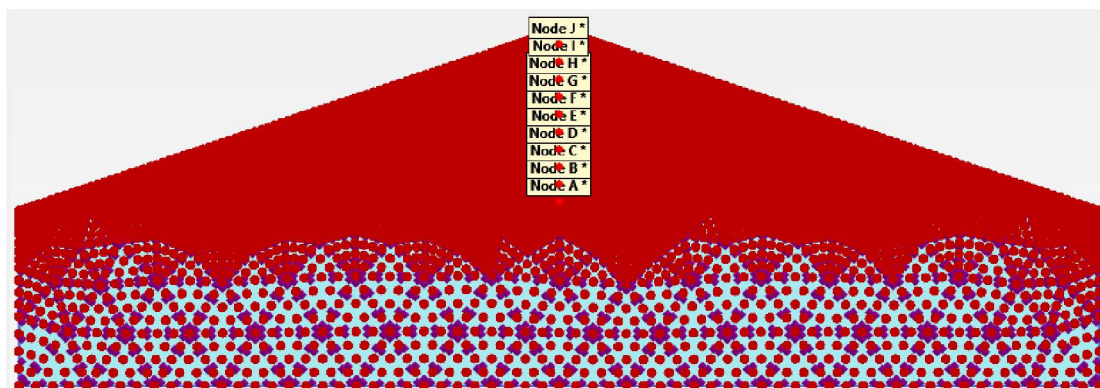


Fig. 3.3 Pontos adoptados para a análise de deslocamentos da barragem

As análises neste programa são feitas em passos, sendo necessários um número de passos por ele definidos para que sejam realizados os cálculos das fases de construção definidas em *Stage Construction*. Para a obtenção dos deslocamentos totais ocorridos na estrutura, interessa registar o deslocamento ocorrido em cada camada. Regista-se o *Step* final de cada fase para que se possa ler o deslocamento correspondente ao final da construção dessa camada.

O deslocamento ocorrido em cada fase da construção da barragem é resultado da soma dos deslocamentos ocorridos na fase plástica com os deslocamentos ocorridos na fase de consolidação.

Assim, elaborou-se um gráfico apresentado na Fig. 3.4, que relaciona os deslocamentos ocorridos em cada camada, durante o processo de construção da barragem, ao longo da altura desta.

Para a construção deste gráfico criou-se uma tabela (Anexo A), com os valores dos deslocamentos retirados para as duas fases de construção de cada camada do aterro. A primeira camada do aterro a ser construída sofre um deslocamento imediato quando é colocada e irá sofrer deslocamentos durante todas as fases de construção da barragem, pois o peso colocado sobre esta vai sendo cada vez maior. Já a última camada do aterro sofre apenas os deslocamentos inerentes à sua colocação e consolidação. Os deslocamentos totais resultam da soma dos valores correspondentes às várias fases de construção, ao longo do tempo de construção e de acordo com a altura da barragem.

Por observação da Fig. 3.4 tem-se que existe uma separação evidente entre os casos onde se considera a existência de saturação e aqueles onde não se considera esta variação do grau de saturação, existindo sempre maiores deslocamentos quando considerada a existência de alguma saturação do material. Refira-se também que os deslocamentos ocorridos na estrutura são menores, quanto menor for o tempo considerado para a consolidação, sendo esta diferença mais evidente para uma altura inferior a 25 metros. Esta diferença mais acentuada deve-se também ao facto de as camadas inferiores sofrerem maiores deslocamentos que as camadas superiores. Na fase final da construção observa-se que as linhas correspondentes às várias situações se encontram praticamente sobrepostas, não existindo praticamente diferenças nos deslocamentos, nem relativamente ao estado de saturação, nem relativamente aos tempos.

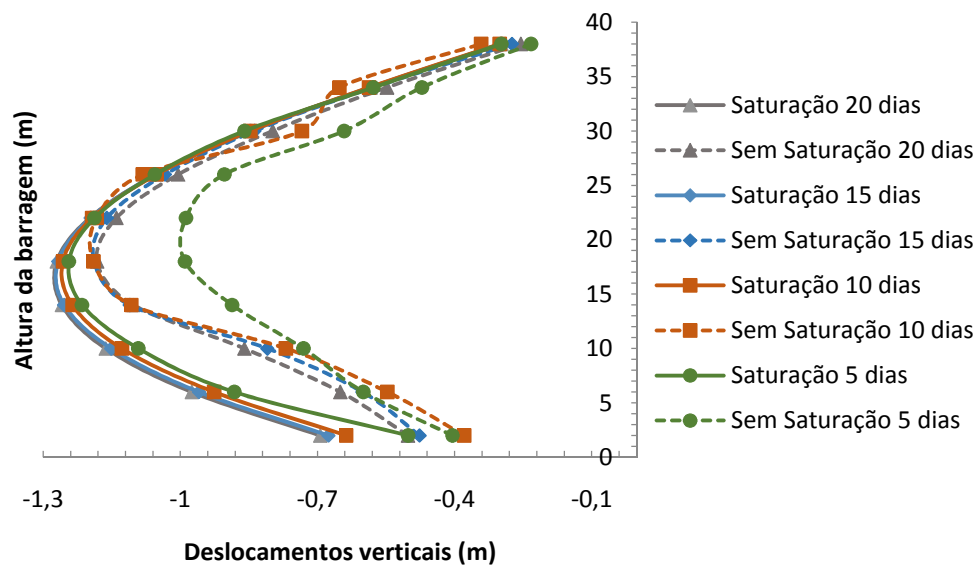


Fig. 3.4 Deslocamentos verticais ao longo da altura da barragem considerando saturação e não saturação do problema

Como se referiu anteriormente, deslocamentos na estrutura provocam uma redistribuição das tensões, pelo que se procede ao estudo das tensões verticais na estrutura. Para o estudo destas foi tida em conta uma secção com a altura da barragem, que passa pela linha média do núcleo (Fig. 3.5). A situação em análise foi o fim da construção da barragem, ou seja, após a construção da ultima camada do aterro.

Começa-se pela análise das tensões totais verticais desenvolvidas na fase final da construção da barragem e, posteriormente, analisam-se as tensões verticais efectivas.

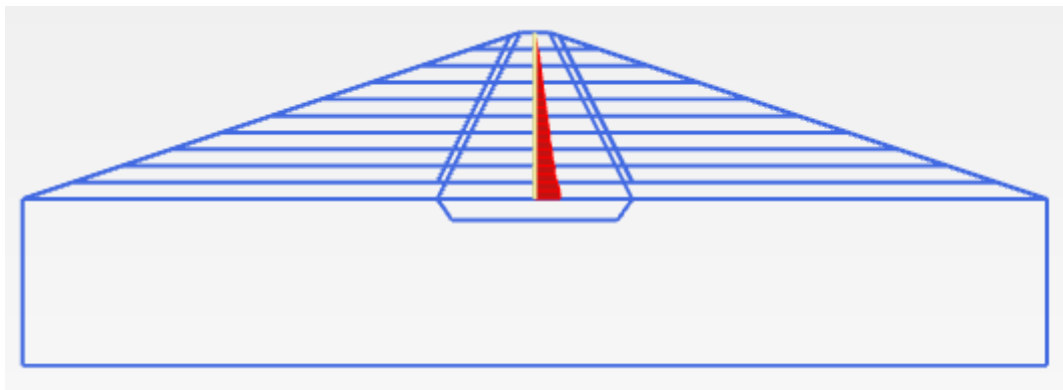


Fig. 3.5 Secção definida para o estudo das tensões verticais do problema

As Fig. 3.6 e Fig. 3.7 representam, respectivamente, gráficos que relacionam as tensões totais verticais e as tensões verticais efectivas, ao longo da altura da barragem. Estes gráficos foram construídos recorrendo a tabelas (Anexo B) onde se colocaram os valores correspondentes às

tensões desenvolvidas no fim da construção ao longo da altura da barragem na secção assinalada.

A determinação destes valores no PLAXIS é feita começado pela definição da secção onde se analisam as tensões verticais, neste caso definiu-se uma secção que passa pelos pontos  $(x,y)=(0,0)$  e  $(0,40)$  recorrendo à ferramenta *Cross Section*. Uma vez definida a secção interessam os valores das tensões totais verticais que se retiram em *Stresses > Cartesian total stresses >  $\sigma_{yy}$* , estes valores podem apresentar-se em tabela, desta tabela interessam os valores de dois em dois metros que correspondem ao início, meio e fim de cada camada, até perfazer a altura total da barragem. Analogamente retiram-se os valores para as tensões verticais efectivas na opção *Cartesian effective stresses*.

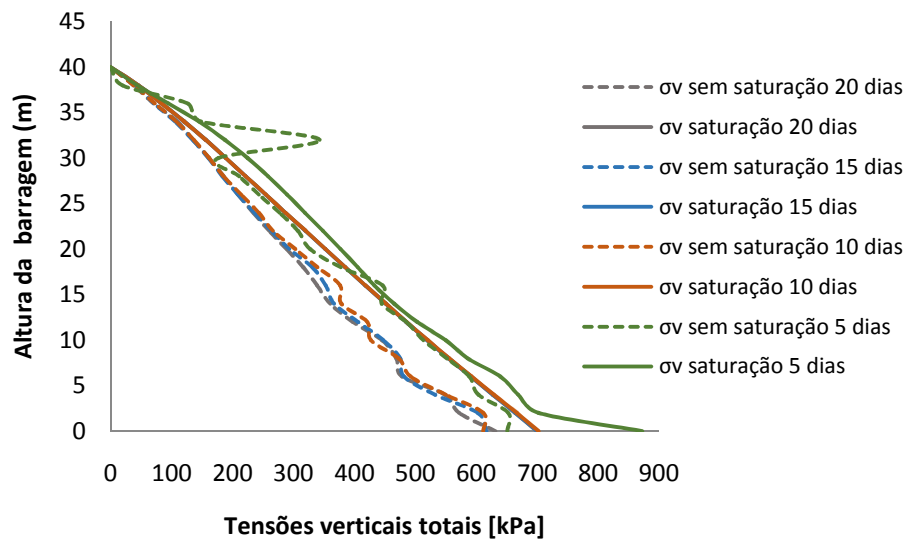


Fig. 3.6 Tensões verticais totais ao longo da altura da barragem considerando saturação e não saturação

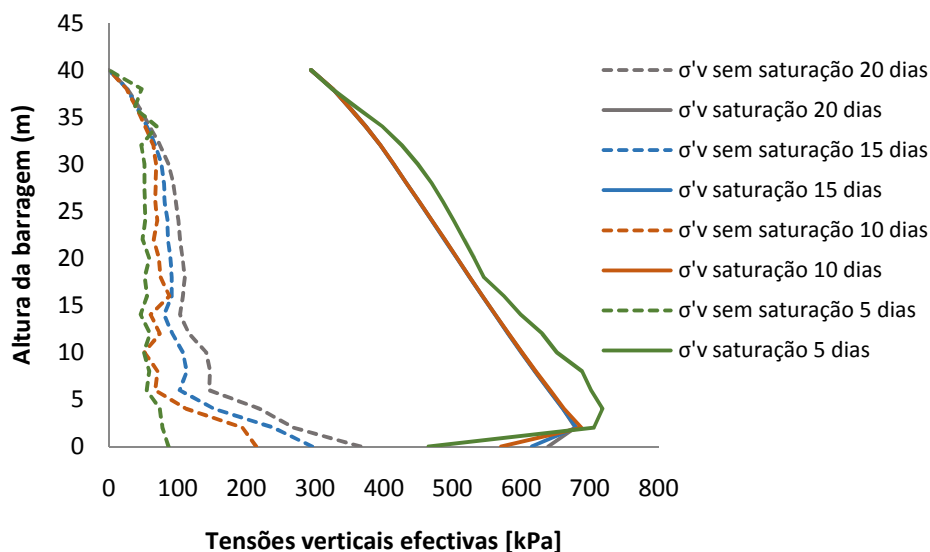


Fig. 3.7 Tensões verticais efectivas ao longo da altura da barragem considerando saturação e não saturação

Observando a Fig. 3.6 chega-se à conclusão que quando se permite a variação do estado de saturação dos materiais constituintes da barragem geram-se tensões superiores às existentes quando não se considera a variação deste estado, existindo diferenças na ordem dos 100 kPa.

Como seria esperado, existem maiores diferenças de tensões para o caso que considera 5 dias para o tempo de consolidação, quando comparado com os restantes. Isto deve-se ao facto de ao considerar-se 5 dias, este não ser um tempo suficiente para que se desenvolvam e estabilizem todas as tensões inerentes ao processo de construção.

Relativamente à Fig. 3.7 verifica-se uma diferença bastante acentuada entre as tensões efectivas considerando um estado de saturação dos materiais e as tensões efectivas obtidas sem esta consideração. Já se esperava que as tensões efectivas fossem as mais influenciadas por esta consideração, pois a sucção associada a este processo gera mais pressões intersticiais. Os valores obtidos para os casos que consideram a existência de saturação no problema revelam-se bastante superiores, cerca de 300 kPa, em relação aos que não consideram. Verificando-se inclusive que, na altura do coroamento, as tensões verticais efectivas são diferentes de zero.

Quanto maior o tempo considerado para a consolidação, maior a dissipação de pressões intersticiais, ou seja, as tensões efectivas vão aumentando com o tempo. Isto não se verifica para o caso em que se consideram os 5 dias mas, como referido anteriormente, este valor não se traduz num tempo suficiente para que se dissipem as pressões existentes.

### 3.4.2 Tempo de construção

A consideração de um estado de saturação dos materiais aumenta os deslocamentos da estrutura com um efeito ainda mais visível nas tensões verticais da mesma, todos os estudos seguintes foram feitos apenas considerando um estado de saturação nos materiais.

Conclui-se que entre os 10 e os 20 dias não surgem grandes diferenças relativamente aos parâmetros estudados. Atendendo ao facto de numa situação de obra quanto maior o tempo de construção maiores serão também os custos associados, eliminou-se de imediato a opção que considera os 20 dias. Para os estudos que se seguem e ao longo de todo o trabalho, optou-se pela consideração de um faseamento construtivo de 15 dias por fase. Desta forma permite-se o desenvolvimento de tensões e para que relativamente aos deslocamentos, quando comparados com os deslocamentos apresentados considerando 10 dias, seja uma solução do lado da segurança.

Admitindo que, em obra, as camadas são de cerca de 30 centímetros, e que cada uma destas é executada num dia, para perfazer 4 metros de altura são necessários cerca de 13 dias, pelo que a escolha de 15 dias é uma escolha ajustada.

### 3.5 Análise de segurança

Por forma a avaliar-se a segurança da barragem, é determinado um coeficiente de segurança que resulta da redução das propriedades dos materiais. Este é definido como uma relação entre a força resistente e a força actuante. O seu valor mínimo aceitável depende do tipo de obra em questão e da verificação da segurança em causa.

Foi feita uma análise de segurança durante a construção da barragem, sendo adicionada a cada fase da construção e após a fase de consolidação, uma fase de análise de segurança. Nesta fase foi utilizado o tipo de calculo "*Safety*" do Plaxis. Desta forma é possível ter uma noção da segurança da barragem durante o seu período de construção.

O programa de elementos finitos Plaxis permite uma análise à segurança da estrutura baseada na determinação de factores de segurança. O Método usado denomina-se por *C-phi reduction*, e procede à redução da resistência das propriedades do solo, ou seja, através de um número limitado de passos, reduz coesão efectiva do solo ( $c'$ ) e a tangente do ângulo de resistência ao corte  $\phi'$ , passo por passo até a massa de solo colapsar.

Para relacionar esta redução dos parâmetros em cada fase da construção da barragem, o programa usa um factor de acordo com a seguinte equação:

$$\Sigma Msf = \frac{\tan \phi_{input}}{\tan \phi_{reduced}} = \frac{c'_{input}}{c'_{reduced}} \quad (3.1)$$

em que,  $\Sigma Msf$  é o factor de redução em casa fase de escavação,  $\tan \phi_{input}$  e  $c'_{input}$  são parâmetros introduzidos e  $\tan \phi_{reduced}$  e  $c'_{reduced}$  são os parâmetros reduzidos pelo PLAXIS durante a análise.

Refira-se que por definição, no início do cálculo,  $\Sigma_{Msf}$  é igual a 1 para que a resistência do solo seja igual à introduzida. Este valor vai aumentando passo por passo até que se dê o colapso da estrutura. Ou seja, no colapso o valor obtido para o coeficiente de segurança é um valor possível para um determinado número de passos sucessivos de carga.

A leitura do factor de segurança associado a cada fase de construção da barragem é feita no Plaxis, seleccionando a fase que se pretende analisar e nos parâmetros de controlo de deformabilidade e dos parâmetros de controlo numéricos, na secção *reached values*, aparece o valor correspondente ao FS como se observa na Fig. 3.8.

Reached values	
Reached total time	165,0 day
CSP - Relative stiffness	0,05926E-6
ForceX - Reached total	0,000 kN
ForceY - Reached total	0,000 kN
Pmax - Reached max p	436,6 kN/m <sup>2</sup>
$\Sigma M_{stage}$ - Reached pha	0,000
$\Sigma M_{weight}$ - Reached we	1,000
$\Sigma M_{sf}$ - Reached safety	1,725

Fig. 3.8 Factor de Segurança correspondente à fase de construção analisada

Obteve-se assim a Fig. 3.9, que indica o valor do coeficiente de segurança para todas as fases de construção. Verifica-se que existe uma oscilação de valores entre 1.996 e 3.13 para os valores dos coeficientes de segurança. Os valores correspondentes à fase de colocação da fundação e escavação da vala corta-águas da construção da barragem foram omitidos.

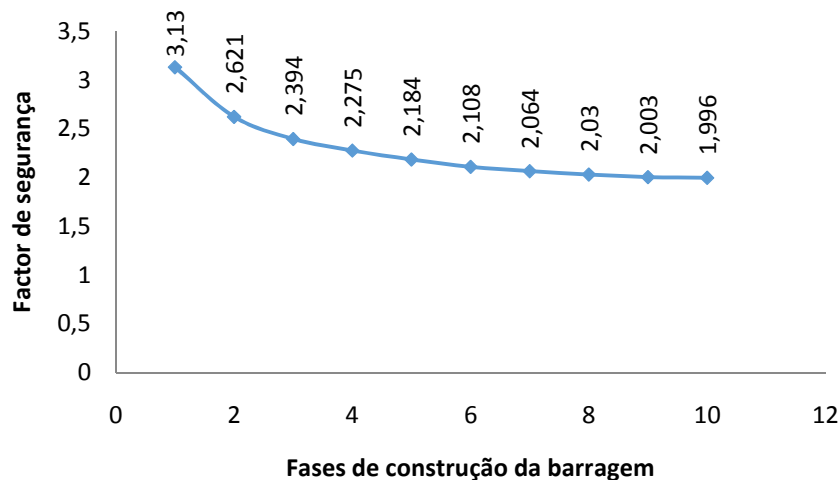


Fig. 3.9 Factor de segurança durante as fases de construção da barragem

Verifica-se então que modelo adotado, garante as condições de segurança necessárias, pelo que se procede ao estudo do efeito de arco no ponto seguinte.

### 3.6 Efeito de Arco

Para o estudo deste efeito é feita uma análise às tensões verticais que serve de base para o cálculo do índice de arco,  $a_r$ , como indicado a seguir.

Em primeiro lugar, apresenta-se a Fig. 3.10 que representa uma distribuição das tensões verticais totais ao longo do corpo da barragem no fim da construção. A figura permite perceber que existe uma clara diferença de tensões entre o maciço e o núcleo da barragem, existindo uma diminuição destas mais acentuada junto ao filtro.

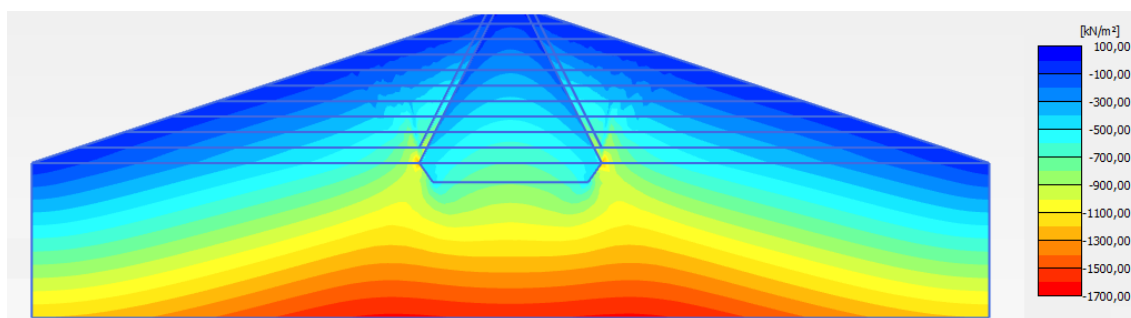


Fig. 3.10 Distribuição de tensões verticais totais no corpo da barragem

O contorno das tensões verticais totais representa uma boa forma de percepção deste efeito. Assim, apresentam-se na Fig. 3.11 as linhas de contorno de tensões verticais ao longo do corpo da barragem, observando-se uma diferença de tensões entre o núcleo e os maciços para o mesmo nível na barragem. Ao observar-se a linha correspondente a K, é de fácil percepção que no centro do núcleo (material representado a amarelo) esta está mais baixa que nos maciços (material representado a verde).

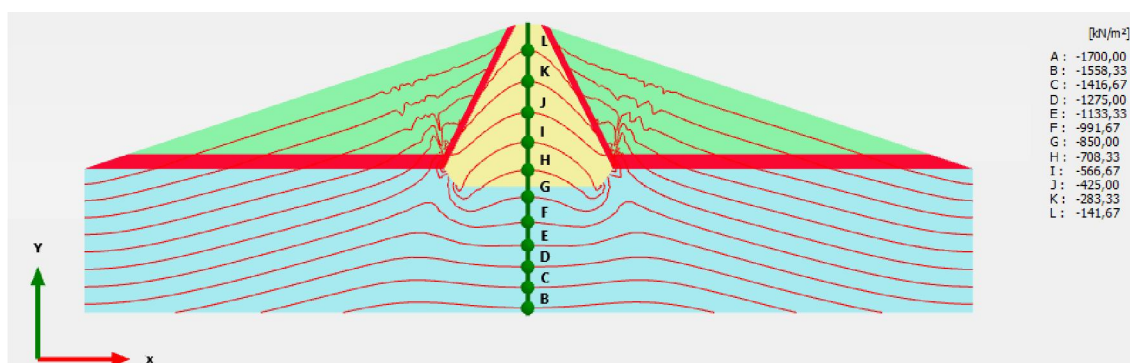


Fig. 3.11 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem (considerem-se como negativas as tensões de compressão)

Para melhor perceber esta diferença, optou-se por pormenorizar uma secção horizontal, Fig. 3.12 e Fig. 3.13 ao longo do corpo da barragem para uma altura de 15 metros, medida a partir da fundação, onde é feito o levantamento de tensões verticais totais para uma secção definida pelos pontos  $x=-60\text{m}$  e  $x=60\text{m}$ . A escolha desta altura vai de encontro a estudos desenvolvidos anteriormente pois de acordo com estes, existe uma maior diferença de tensões entre  $1/3$  e  $2/3$  da altura total da barragem, sendo que estas diferenças são mais acentuadas junto à base da barragem. De referir que o sinal negativo das tensões na Fig. 3.13 indica tensões de compressão.

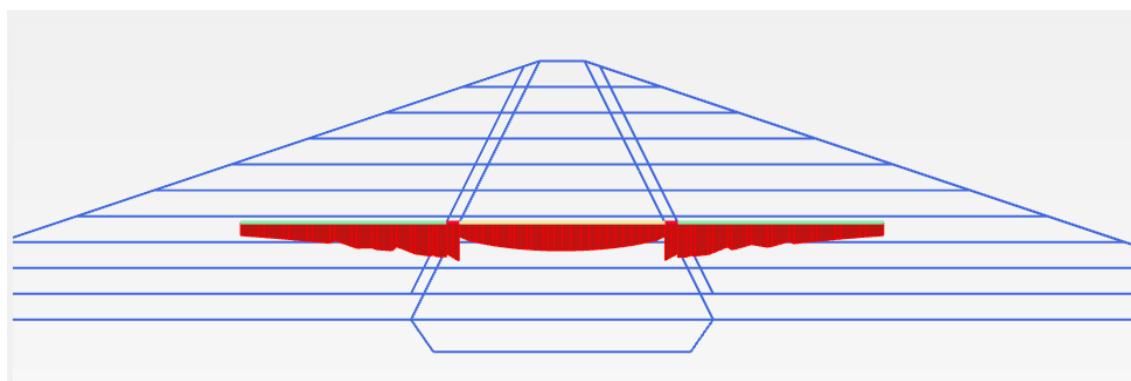


Fig. 3.12 Tensões verticais totais numa secção a 15 metros de altura da barragem



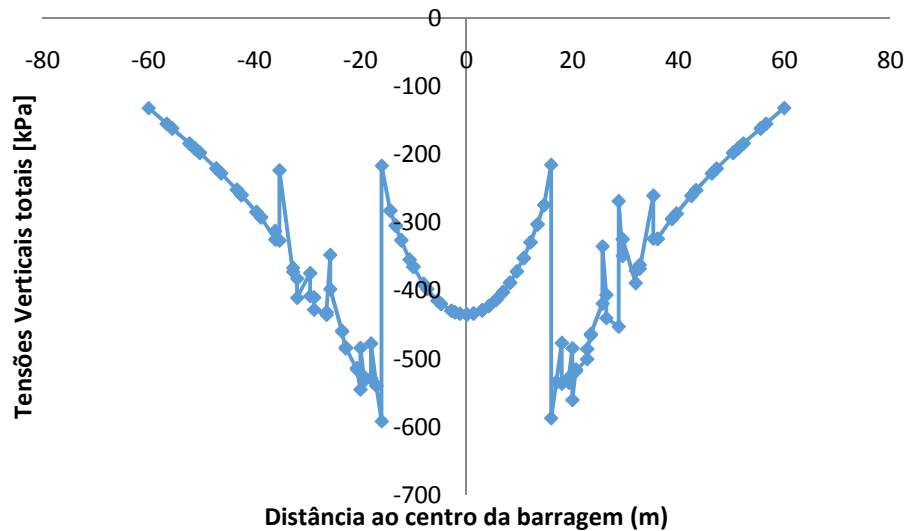


Fig. 3.13 Tensões verticais totais ao longo da barragem numa secção de altura igual a 15 metros

As figuras mostram claramente que no núcleo, junto ao material de transição, existe uma diminuição das tensões e, embora voltem a aumentar, ainda assim, no centro do núcleo são sempre menores quando comparadas com as tensões instaladas no maciço

Como se referiu em 2.2.2. diferentes autores caracterizaram o efeito de arco recorrendo a diferentes relações entre as várias tensões, variando também o local onde estudaram esse efeito. Tendo em conta esses estudos torna-se relevante estudar três cenários diferentes:

- um primeiro cenário que consiste num estudo das tensões verticais considerando a secção central do núcleo e tendo por base a expressão (2.3) para cálculo do índice de arco,  $a_r$ ;
- um segundo cenário onde é feito o levantamento de tensões verticais no núcleo junto aos materiais do filtro, tendo por base também a expressão (2.3) para o cálculo de  $a_r$ ;
- e por fim, um terceiro cenário em que é feita uma comparação de tensões verticais totais retiradas junto ao filtro, do lado do núcleo e, junto ao filtro do lado do maciço.

Na Fig. 3.14 apresenta-se a localização da secção A-A' em estudo para o cenário 1. Esta passa pela linha central do núcleo e é definida pelas coordenadas dos pontos  $(x,y)=(0,40)$  e  $(x,y)=(0,0)$ .

A Fig. 3.15 apresenta a secção B-B' em estudo para o cenário 2. Esta é uma secção no núcleo, junto ao material do filtro, pois, de acordo com o estudado em 3.6.3 verifica-se que é onde

existe o maior decréscimo nas tensões verticais. Definiu-se esta secção recorrendo aos pontos  $(x,y)=(3,40)$  e  $(x,y)=(-23,0)$ .

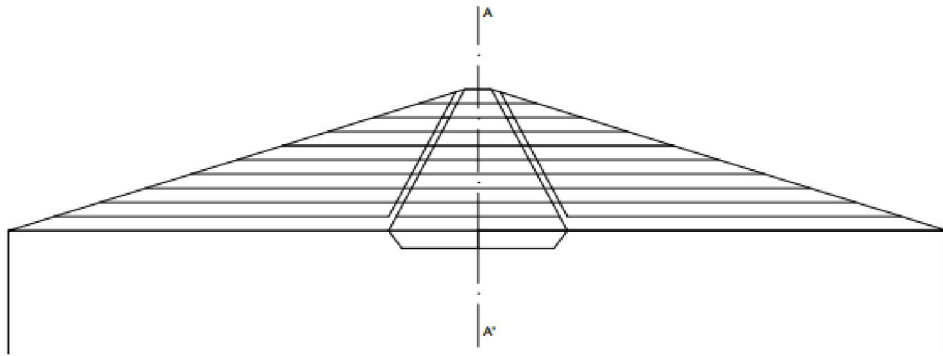


Fig. 3.14 Cenário 1 de estudo para o efeito de arco

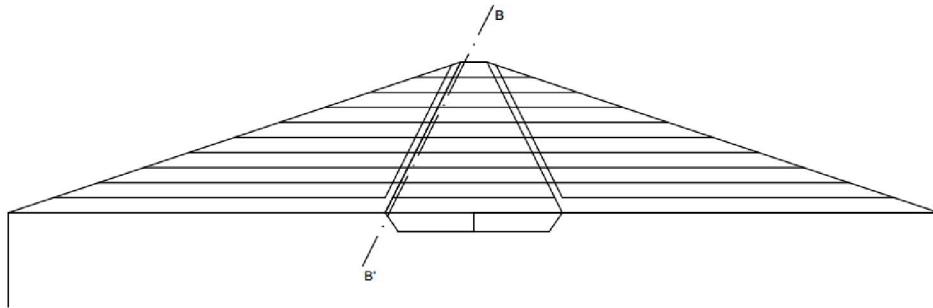


Fig. 3.15 Cenário 2 de estudo para o efeito de arco

Para estes dois primeiros casos, considere-se o índice de arco calculado com a expressão (3.2) já anteriormente referida em (2.3)

$$a_r = \frac{\sigma_v}{\gamma H} \quad (3.2)$$

Nestes estudos,  $\sigma_v$  é um valor retirado da modelação feita recorrendo ao Plaxis.

Para os cenários descritos acima, cenário um e dois, comparem-se as tensões verticais totais retiradas do Plaxis com as tensões teóricas verticais para a mesma altura de barragem (Fig. 3.16).

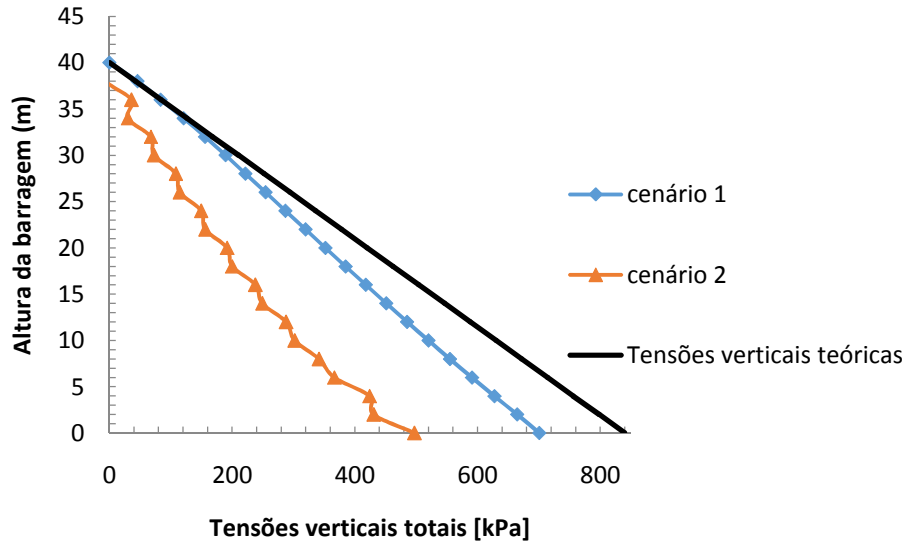


Fig. 3.16 Comparação das tensões verticais totais e das tensões verticais teóricas em função da altura da barragem para os cenários 1 e 2

Por observação da Fig. 3.16 tem-se que o Cenário 1 apresenta sempre tensões verticais totais inferiores às tensões do Cenário 2. Tendo uma diferença entre os dois cenários na ordem dos 200 kPa, junto à base da barragem, diferença esta que tende a diminuir ao longo da altura da barragem. Uma vez que as tensões obtidas para o Cenário 1 se afastam das tensões teóricas conclui-se que este caso apresenta efeito de arco. O mesmo se conclui no caso do Cenário 2. As tensões junto ao filtro são sempre muito inferiores às tensões observadas no centro da barragem, razão que leva a crer que este cenário apresentará maiores valores para o efeito de arco.

O efeito de arco caracteriza-se essencialmente por uma diferença de tensões entre os materiais que compõem o núcleo da barragem e os materiais do núcleo. Assim, surge o Cenário 3, representado na Fig. 3.17. Este tem por objectivo o estudo das tensões verticais existentes no maciço ao longo da secção C-C' e compará-las com as tensões verticais retiradas ao longo da secção B-B'. Nos cenários anteriores as tensões verticais retiradas do Plaxis são comparadas com uma tensão vertical teórica, nunca se chegando a fazer o levantamento das tensões existentes no maciço. Assim, procede-se ao estudo das tensões nas secções B-B' e C-C'. A secção B-B' foi definida anteriormente para o Cenário 2 e a secção C-C' é definida pelas coordenadas dos pontos (x,y)=(-6.5,40) e (x,y)=(-26.5,0).

Para o último caso de estudo, considere-se o índice de arco como:

$$a_r = \frac{\sigma_{vnúcleo}}{\sigma_{vmacijo}} \quad (3.3)$$

Neste ultimo caso, ambos os valores para as tensões verticais totais são retirados da modelação numérica.

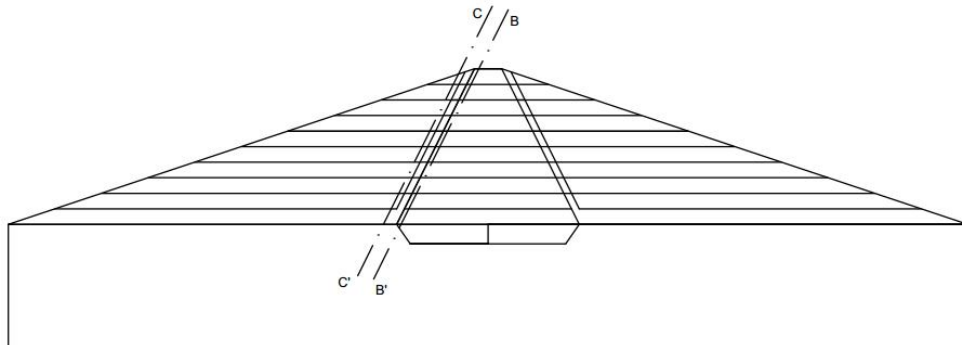


Fig. 3.17 Cenário 3 de estudo para o efeito de arco

Relativamente à expressão (3.3) tem-se que, quanto mais afastado da unidade for o valor de  $a_r$ , maiores as diferenças entre as tensões logo, maior será o efeito de arco registado nesse ponto.

A Fig. 3.18 indica os valores obtidos para o índice de arco para os três cenários acima mencionados. Nesta, ignorem-se os valores negativos, e, para o índice de arco, os valores maiores que a unidade, estes representam que neste caso houve uma transferência de tensões do maciço, para o núcleo pois as tensões teóricas são superiores às tensões verticais totais medidas.

Por observação da Fig. 3.18 retira-se que, o efeito de arco é maior nos três cenários, para uma altura entre 1/3 e 2/3 da altura total da barragem. O primeiro cenário, à semelhança do que seria esperado aquando do estudo das tensões verticais na Fig. 3.16, é o que apresenta valores menores para o efeito de arco, pois o centro do núcleo é onde as tensões atingem menores valores quando comparadas com os restantes. Neste caso o valor máximo do índice de arco é atingido aproximadamente aos 15 metros de altura e é igual a 0.8.

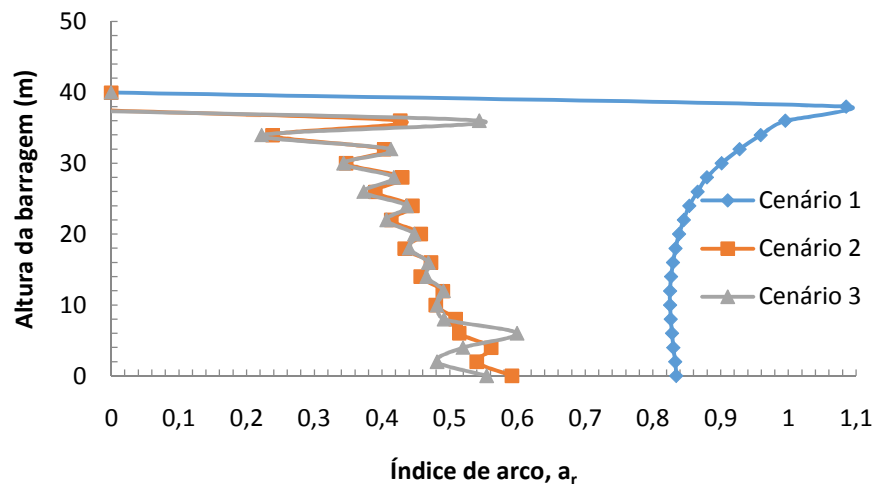


Fig. 3.18 Índice de arco em função da altura da barragem para os vários cenários

Da figura retira-se ainda que os estudos referentes aos Cenários 2 e 3 apresentam resultados bastante semelhantes, sendo que os pontos máximos e mínimos para este efeito ocorrem à mesma altura da barragem. Ignorando os pontos em que  $a_r$  apresenta valores negativos ou valores iguais a zero, podemos assumir que a altura crítica do efeito de arco ocorre entre os 30 e os 34 metros. Uma vez que estes dois cenários apresentam valores bastante semelhantes e, por simplificação do estudo, daqui em diante será apenas feito o estudo relativo ao Cenário 2. Este apresenta os valores mais condicionantes quando comparado com o Cenário 1. Ao se considerar o cenário 2 em detrimento do Cenário 3, para os estudos a desenvolver, assume-se que a tensão vertical teórica é bastante semelhante aos valores retirados do programa para a tensão vertical total no maciço.

A Fig. 3.19 representa o efeito de arco para a secção de tensões verticais totais estudada anteriormente (Fig. 3.12) ao longo do eixo horizontal do perfil transversal da barragem a uma altura de 15 metros, considerando para efeitos de cálculo o cenário dois.

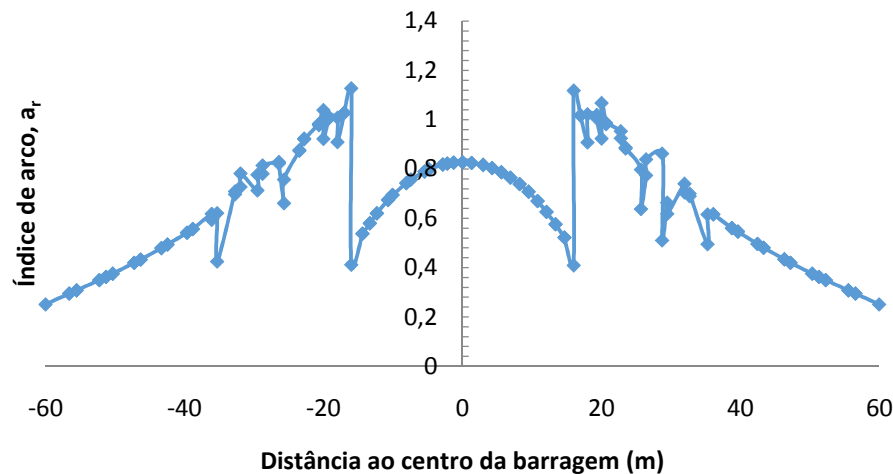


Fig. 3.19 Efeito de arco ao longo do eixo horizontal da barragem para uma altura de 15 metros

Esta figura apresenta uma configuração diferente da Fig. 3.12 pois as tensões obtidas no Plaxis são negativas, e índice de arco foi calculado considerando as tensões positivas. À semelhança do que se analisou anteriormente, da observação da Fig. 3.19 retiram-se como mais condicionantes para o efeito de arco as secções junto aos materiais de transição, pois são os valores onde o efeito de arco é máximo. Junto a estes encontram-se os pontos onde este efeito é mínimo, voltando a sentir-se mais quando considerados pontos no maciço mais afastados do núcleo

## 4 Estudo paramétrico: Factores que influenciam o efeito de arco de uma barragem de terra

### 4.1 Generalidades

No capítulo dois referiram-se como factores com maior influência no efeito de arco a relação entre o módulo de deformabilidade do maciço e do núcleo, a inclinação dos taludes do núcleo e o ângulo de resistência ao corte, pelo que, tendo como caso base o descrito no capítulo três se procede ao estudo da influência desses parâmetros. Optou-se também por estudar a influência da altura da barragem no efeito de arco, uma vez que em nenhum dos estudos analisados se abordou este parâmetro. Assim, procurou-se estudar uma barragem de menores dimensões por forma a ter um termo comparativo dado que as barragens estudadas no capítulo dois são de grandes dimensões e a considerada no caso base de dimensões médias.

Para cada um dos parâmetros descritos acima efetuaram-se algumas análises variando as propriedades dos materiais, ou propriedades geométricas, tal como indicado na Tabela 4.1. Nesta resumem-se os parâmetros estudados, os valores correspondentes ao caso base e quais as alterações efectuadas em relação ao caso base estudado. Estas alterações serão explicadas e justificadas ao longo da análise aos respectivos parâmetros.

À semelhança do que foi feito no capítulo três, para cada um dos parâmetros descritos, procede-se neste capítulo à análise da distribuição das tensões verticais totais ao longo do corpo da barragem, à análise da diferença de tensões verticais totais ao longo de uma secção junto ao material do filtro e à determinação das tensões verticais teóricas. Procede-se ainda, à análise das tensões verticais totais ao longo do eixo horizontal do perfil transversal da barragem para uma altura igual a 15 metros. A vantagem desta distribuição de tensões é que é de fácil percepção a diferença de tensões ao longo dos vários materiais que compõem a barragem. Por fim, analisa-se o efeito de arco ao longo da altura da barragem para a secção definida anteriormente e ao longo do eixo horizontal da barragem para uma altura de 15 metros. Refira-se que todas estas análises são efectuadas para o fim da construção da barragem.

Para quantificar o efeito de arco considera-se a expressão 2.3 descrita anteriormente no capítulo dois, que indica que, quanto mais afastado e menor que a unidade for o valor obtido, maior o efeito de arco na estrutura, ou seja, quando o índice de arco  $a_r=1$ , não existe efeito de arco.

Tabela 4.1 Valores adotados para o estudo paramétrico

Parâmetro a estudar	Modelo Base	Parâmetros fixos	Variações analisadas
$E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$	$E_{\text{maciço}}=40\text{MPa};$ $E_{\text{núcleo}}=5\text{MPa}$ $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=8;$	$E_{\text{núcleo}}=5\text{MPa}$	$E_{\text{maciço}}=50\text{MPa};$ $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=10;$ $E_{\text{maciço}}=70\text{MPa};$ $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=14;$
$\phi'_{\text{núcleo}}$	$\phi'_{\text{núcleo}}=28^\circ$	$\phi'_{\text{maciço}}=30^\circ$	$\phi'_{\text{núcleo}}=15^\circ; \phi'_{\text{núcleo}}=20^\circ;$
$\phi'_{\text{maciço}}$	$\phi'_{\text{maciço}}=30^\circ$	$\phi'_{\text{núcleo}}=28^\circ$	$\phi'_{\text{maciço}}=35^\circ; \phi'_{\text{maciço}}=40^\circ;$
Altura da barragem	H=40m	Propriedades dos materiais do caso base	H=20m
Inclinação do núcleo	2V:1H	Propriedades dos materiais do caso base	4V:1H; 6V:1H; 1V:1H

## 4.2 Influência da relação entre a deformabilidade do maciço e do núcleo

### 4.2.1 Generalidades

No capítulo dois, os estudos analisados consideraram que quanto mais elevado for o valor da relação entre a deformabilidade do maciço e a deformabilidade do núcleo, maior será o efeito de arco na estrutura, pois quanto maior, menores são as tensões no núcleo, havendo uma maior transferência destas para os maciços.

Neste ponto pretende-se estudar a influência que a relação entre o módulo de deformabilidade do maciço e o módulo de deformabilidade do núcleo tem no efeito de arco. Para a análise deste problema manteve-se constante o módulo de deformabilidade do núcleo igual a 5MPa e variou-se o módulo de deformabilidade do maciço considerando-se, além do caso base ( $E_{\text{maciço}}=40$  MPa) duas situações: uma em que o módulo de elasticidade do maciço tem como valor 50 MPa e outra em que este toma o valor de 70 MPa. Para a análise deste parâmetro obtêm-se assim valores da razão entre o módulo de elasticidade do maciço e o módulo de elasticidade do núcleo de  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=8$  (caso base),  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=10$  e  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=14$ . (Tabela 4.1)

A escolha destes valores teve por base os trabalhos referidos no capítulo dois, onde se analisaram relações a mesma ordem de grandeza. .

### 4.2.3 Tensões Verticais

As Fig. 4.1, Fig. 4.2 e Fig. 4.3 representam os contornos da distribuição de tensões verticais totais. Em todos os casos se verificam que as tensões no núcleo são inferiores às tensões para a mesma altura de barragem no maciço, evidenciando a presença de efeito de arco na estrutura. As figuras permitem uma observação clara das diferenças de tensões entre os vários materiais e, das diferenças entre os três casos analisados.

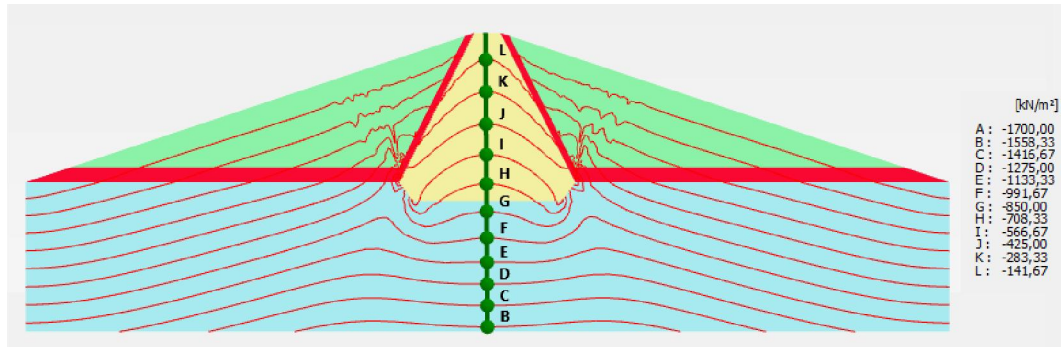


Fig. 4.1 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para a relação  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=8$

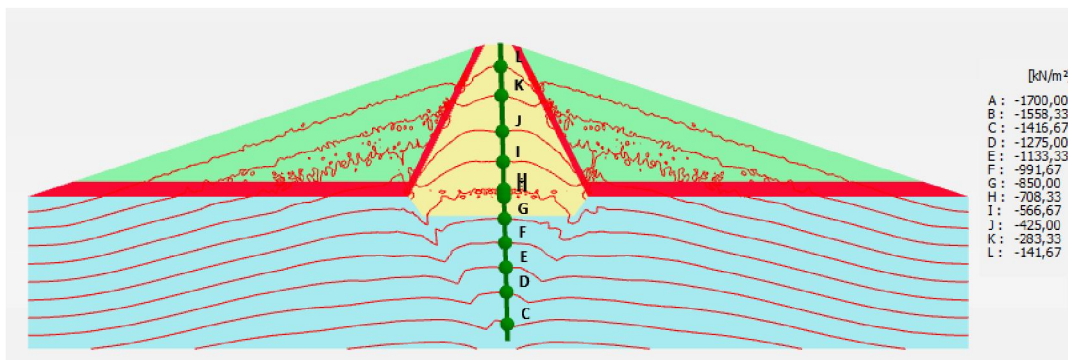


Fig. 4.2 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para a relação  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=10$

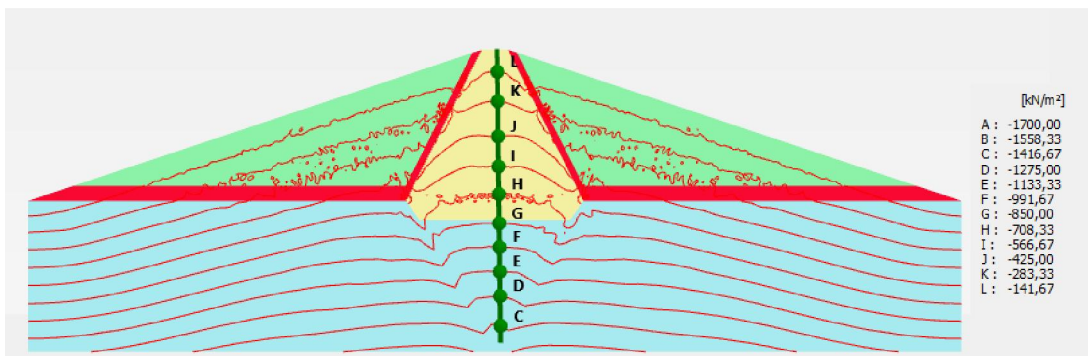


Fig. 4.3 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para a relação  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=12$

Na Fig. 4.1, tal como se referiu no capítulo três, observa-se uma clara diferença de tensões entre o núcleo da barragem e o maciço considerando a mesma altura e barragem, sendo claro o



efeito de arco neste caso. As Fig. 4.2 e Fig. 4.3 apresentam uma distribuição de tensões semelhante, sendo possível ver um aumento de tensões no núcleo comparativamente à Fig. 4.1. As tensões no maciço também sofrem alterações, tendo pequenos aumentos e decréscimos perto da meia altura da barragem. Ainda assim, observam-se sempre tensões mais elevadas do que as tensões no núcleo da barragem.

A Fig. 4.4 relaciona as tensões verticais totais obtidas no Plaxis ao longo da altura da barragem para os três casos, tendo como termo de comparação as tensões verticais teóricas ao longo da mesma altura. A leitura da figura permite antecipar as zonas onde existem maiores diferenças entre as tensões, pois estas serão também as zonas onde existe maior efeito de arco. Estas diferenças observam-se junto à base da barragem, sendo que perto do coroamento não se esperam efeitos de arco elevados. A relação que apresenta maiores diferenças relativamente às tensões verticais teóricas é o caso base em que  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=8$ , onde se verifica uma diferença entre 250 e 350kPa ao longo de praticamente toda a altura.

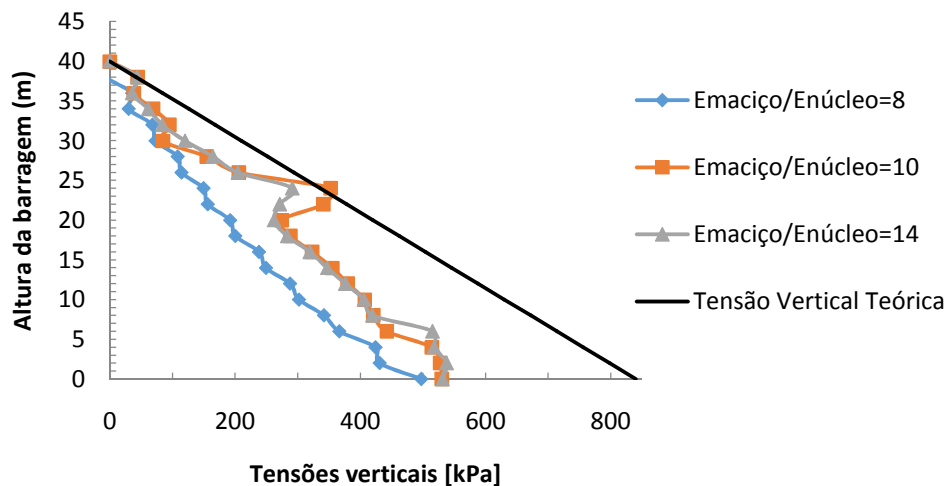


Fig. 4.4 Comparação das tensões verticais totais e das tensões verticais teóricas em função da altura da barragem para as diferentes relações  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$

Complete-se o estudo relativo às tensões verticais na barragem fazendo a leitura das tensões totais ao longo do eixo horizontal de um perfil transversal da barragem, numa secção a 15 metros de altura da barragem, representada na Fig. 4.5. Constata-se que à semelhança da anterior, não existe uma grande diferença entre as relações  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=10$  e 14 sendo que os pontos correspondentes às tensões verticais totais no núcleo se encontram praticamente sobrepostos, o que, de acordo com as análises feitas anteriormente relativamente às tensões totais, já seria o esperado. Os pontos máximos e mínimos dizem respeito à relação  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=8$ , ou seja ao caso base analisado, onde se obtêm diferenças de valores de 400kPa junto ao filtro.

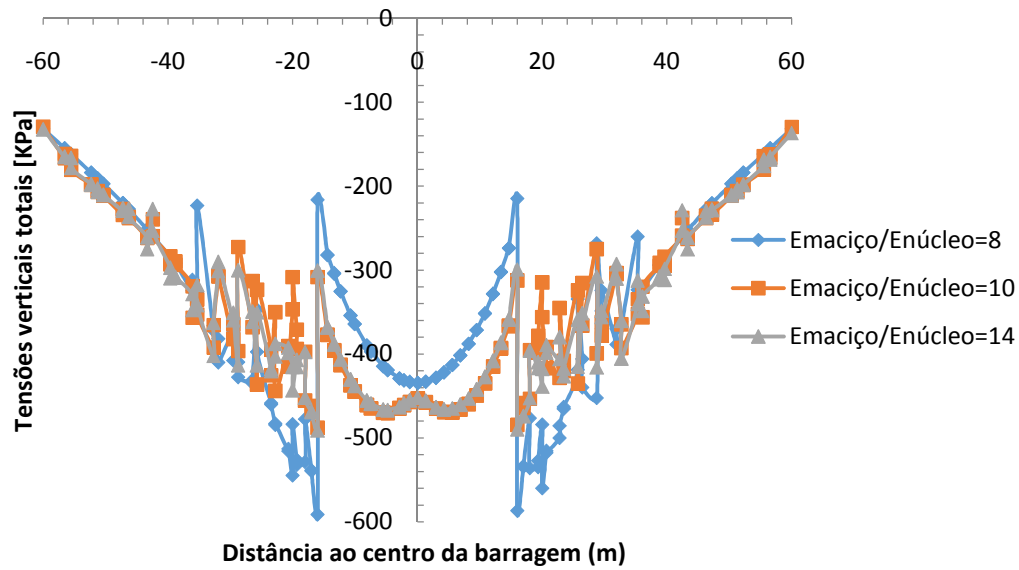


Fig. 4.5 Tensões verticais totais ao longo da barragem numa secção de altura igual a 15 metros para as diferentes relações  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$

#### 4.2.4 Índice de arco, $a_r$

A Fig. 4.6 representa o efeito de arco ao longo da altura da barragem, para as três relações de deformabilidade do maciço e núcleo.

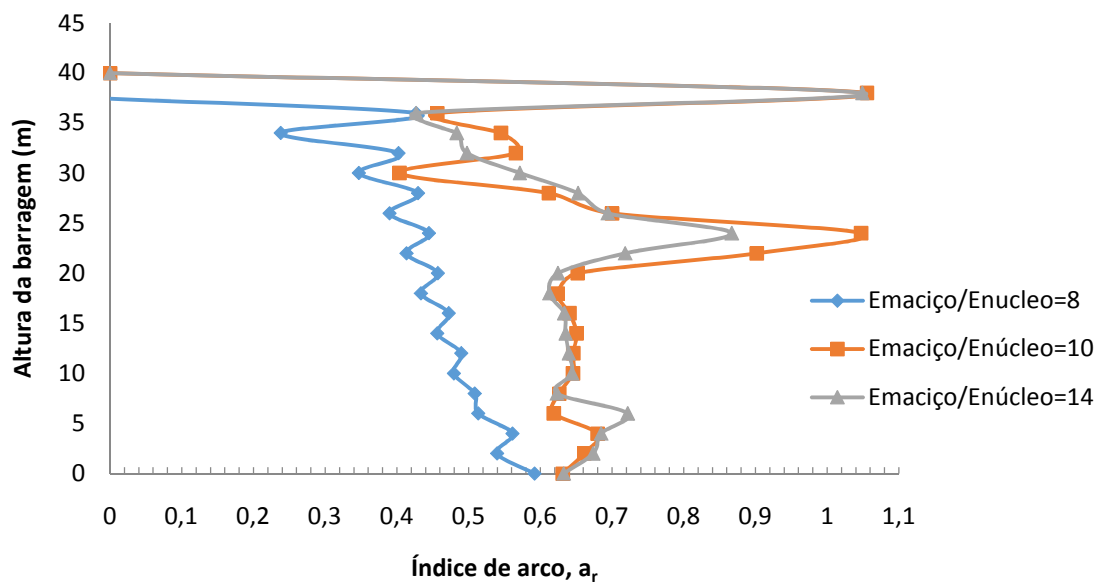


Fig. 4.6 Índice de arco em função da relação  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$

Analisando a figura conclui-se que, à semelhança do que se estava à espera pelo estudo de tensões, o caso base representa a situação que tem maior efeito de arco, não existindo grandes diferenças entre os outros dois casos. Observa-se que para a relação  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=8$  se obtém um valor máximo aos 30 metros e que este corresponde a um índice de arco de aproximadamente 0.35. Para o caso em que  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=10$ , considere-se o valor, para a mesma altura, de cerca de 0.4. Analogamente se tem que quando  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=14$  o valor máximo para o índice de arco obtém-se um pouco acima dos 30 metros, aos 32, e atinge o valor de 0,5.

A Fig. 4.7 representa a mesma secção horizontal da Fig. 4.5, ao longo da qual foram calculados os efeitos de arco considerando as diferentes relações de deformabilidade entre os maciços estabilizadores e o núcleo da barragem.

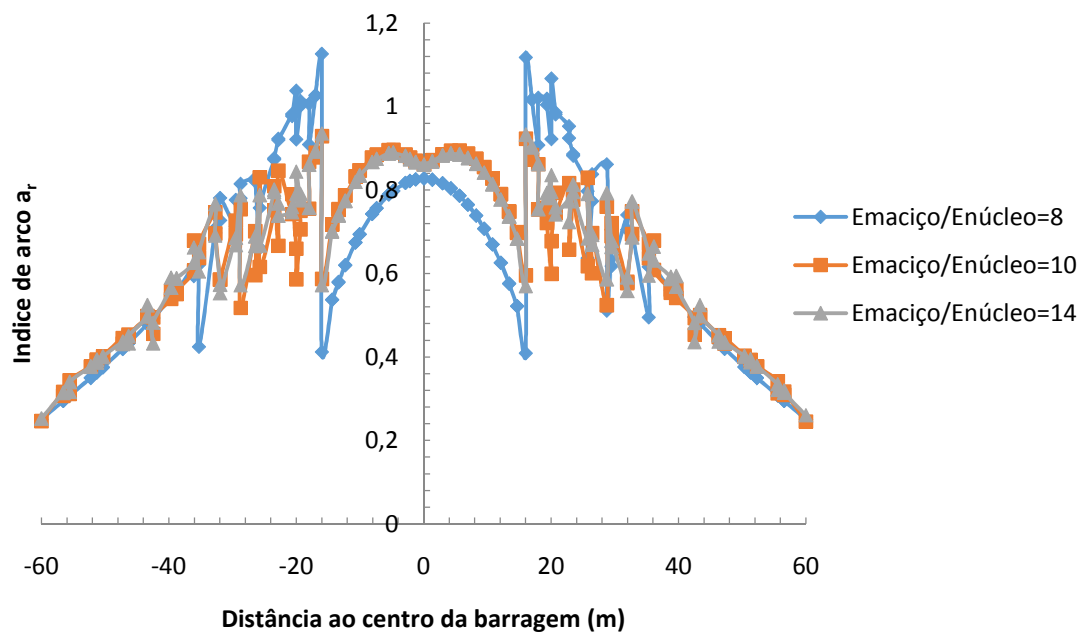


Fig. 4.7 Efeito de arco ao longo do eixo horizontal da barragem para uma altura de 15 metros para as diferentes relações  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$

Como se verifica na Fig. 4.7 o caso mais condicionante é o caso base pois apresenta um maior efeito de arco. A zona entre o centro do núcleo e o material do filtro é a zona onde se observa maior diferença. Por exemplo, aos 10 metros de distância ao centro da barragem tem-se uma diferença na ordem de 0.2 para o valor do índice de arco, quando comparados os vários casos. Ao analisar-se o centro do núcleo, à semelhança do que fizeram alguns dos autores referidos no estudo bibliográfico, conclui-se que o efeito de arco nessa zona assume o valor mínimo quando comparado a outras zonas do núcleo, observe-se também que na linha central não existe uma diferença significativa entre os três casos.

Por forma a comparar os estudos analisados no capítulo dois com o presente estudo, indicam-se os valores obtidos neste capítulo na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Resumo dos valores obtidos para a relação  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$ .

$\frac{E_{\text{maciço}}}{E_{\text{núcleo}}}$	$a_r$	H	% de Altura
8	0.35	30	75
10	0.4		
14	0.5	32	80

Nos estudos anteriores (Tabela 2.1) observou-se que os valores máximos para o índice de arco ocorrem a alturas próximas dos 60% da altura total da barragem concluindo-se que quanto maior o valor da relação  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$  maior o efeito de arco observado. No presente estudo, observa-se um maior efeito de arco para alturas compreendidas entre os 75 e 80% da altura total da barragem, tendo-se concluído que a situação mais condicionante é quando  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=8$ .

Tendo por objectivo que se tente aferir quais as possíveis razões para a obtenção de diferentes resultados., apresenta-se a Tabela 4.3 que contém a altura total de cada barragem bem como os materiais utilizados na constituição das diferentes barragens analisadas anteriormente e no presente estudo.

Tabela 4.3 Comparação de valores entre os casos base considerados e as alterações para a influência da relação  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$

	Talebiet al (2013)	Elmi&Mirghasemi (2013)	Presente estudo
<b>Altura, H (m)</b>	102	128	40
<b>E núcleo [MPa]</b>	10	35	5
<b>E Maciço [MPa]</b>	50	102	40
<b>E Maciço 1 [MPa]</b>	80	*	50
<b>E Maciço 2 [MPa]</b>	120	*	70

\* este estudo não especifica se manteve o núcleo constante e alterou os valores de E do maciço, ou o contrário, referindo apenas a grandeza das relações estudadas.

A conclusão obtida nesta análise não coincidiu com a conclusão que se obteve no estudo bibliográfico no capítulo dois, pois concluiu-se que o maior efeito de arco se observou para a relação  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=8$  ao contrário dos outros autores que concluíram que quanto maior o valor desta relação, maior o efeito de arco observado. Em primeiro lugar, Talebi et al. (2013) analisam uma barragem de enrocamento, onde o efeito de arco é, regra geral, superior ao de uma barragem de terra. Em segundo lugar, refere-se que as tensões verticais não foram analisadas na mesma secção para todos os estudos: Elmi & Mirghasemi (2013) estudaram as

tensões verticais no centro do núcleo e nos outros estudos analisam-se as tensões no núcleo, junto ao filtro. Anteriormente já se havia concluído que o efeito de arco é superior junto aos filtros quando comparado com o centro do núcleo. E, por fim, a própria diferença de alturas das barragens em estudo pode influenciar esta diferença de resultados, repare-se que a altura da barragem de Elmi & Mirghasemi (2013) é três vezes superior à altura da barragem do presente trabalho.

### 4.3 Influência do Ângulo de Resistência ao Corte $\phi'$

#### 4.3.1 Generalidades

Da análise bibliográfica realizada no capítulo dois retirou-se que o ângulo de resistência ao corte tem um papel importante no efeito de arco pois altera as tensões verticais. Dos estudos concluiu-se que quanto maior  $\phi'_{\text{núcleo}}$  menor o efeito de arco e, quanto maior o valor de  $\phi'_{\text{filtro}}$ , maior o efeito de arco na estrutura.

Neste estudo da influência do ângulo de resistência ao corte no que diz respeito ao efeito de arco, foram tidas em conta as duas situações descritas na Tabela 4.1: uma primeira em que se manteve constante  $\phi'_{\text{núcleo}}=28^\circ$  e variou-se o ângulo de resistência ao corte do maciço para os valores de  $35^\circ$  e  $40^\circ$ , comparando-os com o caso base em que  $\phi'_{\text{maciço}}=30^\circ$ , e uma segunda análise em que se manteve constante  $\phi'_{\text{maciço}}=30^\circ$  e variou-se os valores do ângulo de resistência ao corte para  $15^\circ$  e  $20^\circ$ , tendo como base de comparação o caso base em que  $\phi'_{\text{núcleo}}=28^\circ$ .

#### 4.3.2 Tensões Verticais Totais

Da Fig. 4.8 à Fig. 4.12 apresentam-se os contornos da distribuição de tensões verticais totais para o caso base, e para a situação em que se mantém constante o ângulo de resistência ao corte do núcleo e se varia o do maciço, e para o caso em que se mantém constante o ângulo de resistência ao corte do maciço e se baixa o do núcleo.

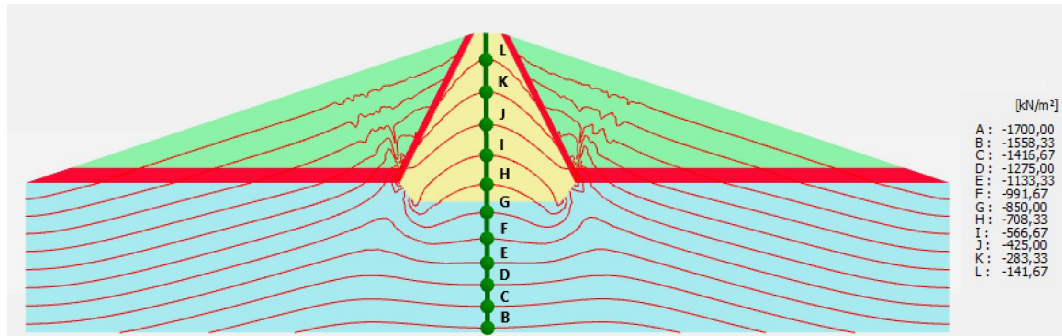


Fig. 4.8 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso base:  
 $\phi'_{\text{núcleo}}=28^\circ$  e  $\phi'_{\text{maciço}}=30^\circ$

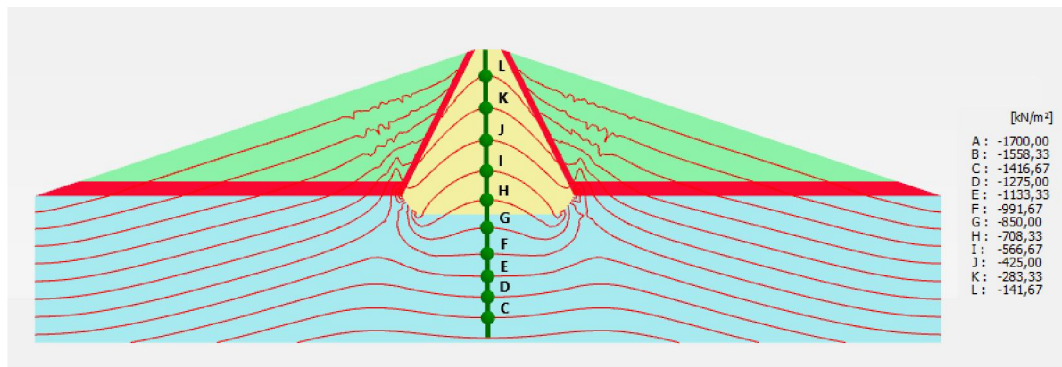


Fig. 4.9 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso  
 $\phi'_{\text{núcleo}}=28^\circ$  e  $\phi'_{\text{maciço}}=35^\circ$ .

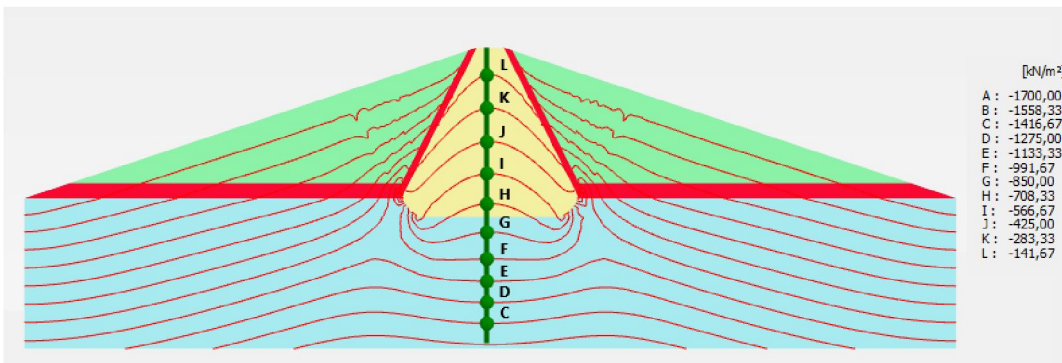


Fig. 4.10 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso  
 $\phi'_{\text{núcleo}}=28^\circ$  e  $\phi'_{\text{maciço}}=40^\circ$ .

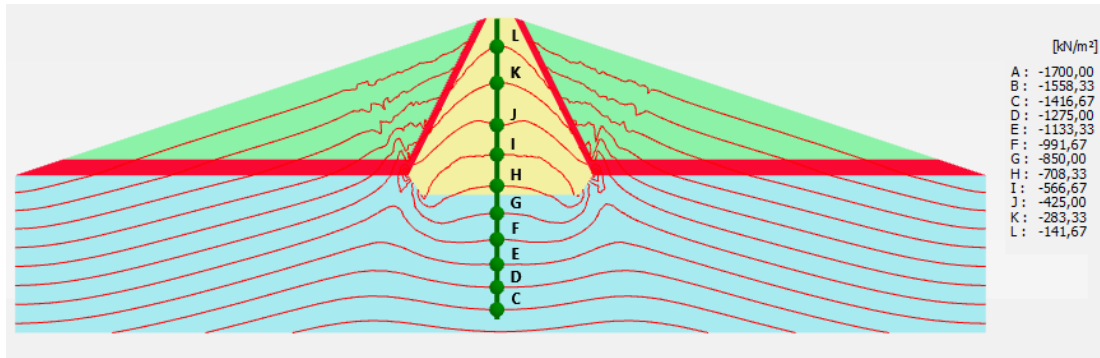


Fig. 4.11 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso  $\phi'_{\text{núcleo}}=15^\circ$  e  $\phi'_{\text{maciço}}=30^\circ$

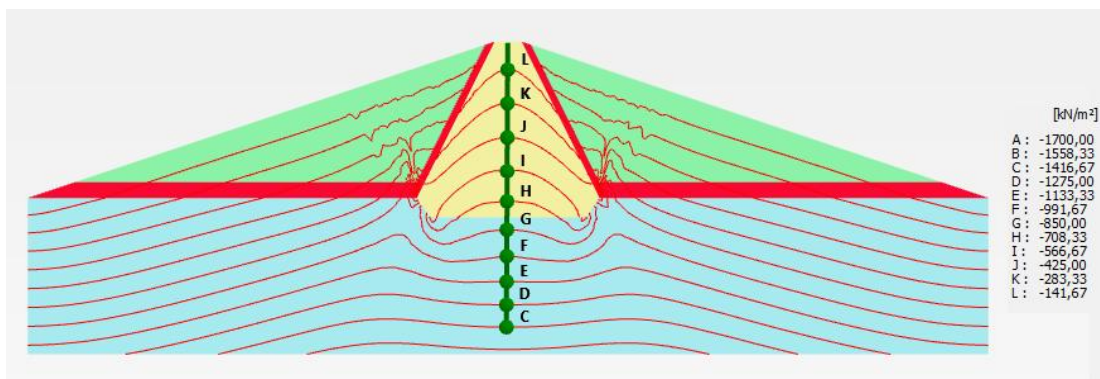


Fig. 4.12 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso  $\phi'_{\text{núcleo}}=20^\circ$  e  $\phi'_{\text{maciço}}=30^\circ$

Considerando as Fig. 4.8, Fig. 4.9 e Fig. 4.10 observa-se uma maior diferença de tensões no núcleo junto ao material do filtro, quando comparado com o centro deste. Por exemplo, ao considerar-se o ponto J, tem-se que as tensões são menores para os casos em que  $\phi'_{\text{maciço}}=35^\circ$  e  $40^\circ$ , pois esta linha desce quando comparada ao caso base, pelo que, para uma mesma altura as tensões são menores nesses dois casos.

Tendo em conta as Fig. 4.8, Fig. 4.11 e Fig. 4.12 observa-se uma diminuição das tensões verticais quanto menor é o valor de  $\phi'_{\text{núcleo}}$ . A diminuição destas tensões é mais acentuada no centro do núcleo do que junto aos materiais do filtro. Por exemplo, o ponto H apresenta menores tensões para uma mesma altura na Fig. 4.11 quando comparada com as outras duas figuras. Junto aos materiais do filtro, refira-se ainda que no maciço existe uma diferença maior de tensões junto à base da barragem, não se observando grandes diferenças quando consideradas alturas superiores.

A Fig. 4.13 representa as tensões totais verticais ao longo da altura da barragem, para os casos em que  $\phi'_{\text{maciço}}=30^\circ, 35^\circ$  e  $40^\circ$  e  $\phi'_{\text{núcleo}}=28^\circ, 15^\circ$  e  $20^\circ$  comparando-as com a tensão teórica. Optou-se por juntar as duas situações na mesma figura pois quando separados os casos não permitiu tirar conclusões, pois as linhas encontram-se bastante sobrepostas, não conseguindo



identificar-se se o efeito de arco se agrava mais por aumento de  $\phi'_{\text{maciço}}$  ou aumento de  $\phi'_{\text{núcleo}}$  em relação ao caso base.

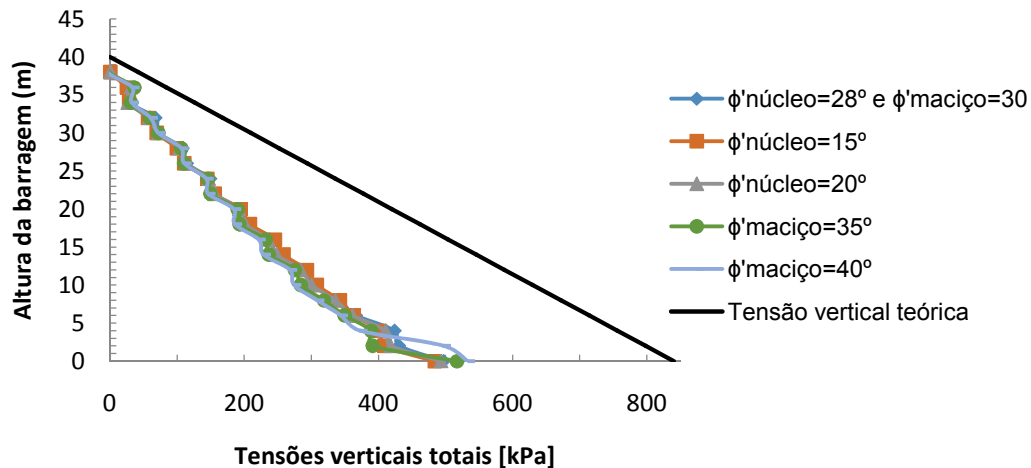


Fig. 4.13 Comparação das tensões verticais totais e das tensões verticais teóricas em função da altura da barragem para o estudo da influência de  $\phi'$

Da observação da Fig. 4.13 tem-se que inicialmente, considerando  $\phi'_{\text{maciço}}=35^\circ$  e  $40^\circ$  existe um aumento de tensões em relação ao caso base, mas que, perto dos 5 metros de altura da barragem esta é uma situação que se inverte e até perto dos 20 metros estas tensões são menores do que o caso base. Considerando alturas superiores, há cada vez menos diferença entre as tensões ao variar os parâmetros. Relativamente à diminuição de  $\phi'_{\text{núcleo}}$  não se observam grandes diferenças de tensões para os casos analisados, sendo que à semelhança do que acontece com os outros casos, estas diferenças são sempre maiores junto à base da barragem.

Conclui-se ainda que junto ao material do filtro, não se observam grandes diferenças nas tensões verticais da barragem provocadas pela alteração dos valores a este parâmetro. Esta já seria uma situação esperada uma vez que pela análise das figuras que mostram o contorno de tensões verticais totais, já se tinha observado que existe uma maior diferença de tensões no centro do núcleo do que na secção analisada.

A Fig. 4.14. relaciona as tensões verticais totais ao longo do eixo horizontal da barragem para uma altura de 15 metros. Observando a figura tem-se que quando  $\phi'_{\text{maciço}}=40^\circ$  existe um aumento de tensões, do lado do maciço, junto ao material do filtro, situação esta que já se tinha observado na Fig. 4.10. Este aumento também é relevante pois pode induzir um aumento do efeito de arco na estrutura quando comparado com os outros casos analisados, pois no centro do núcleo as tensões não sofrem grandes alterações. O único caso onde existe uma diminuição significativa das tensões no centro do núcleo é quando se considera  $\phi'_{\text{núcleo}}=15^\circ$ , o que já se tinha observado na Fig. 4.11. Caso o efeito de arco fosse analisado na linha central do núcleo iriam obter-se diferenças relativamente aos outros casos. De um modo geral conclui-se que as tensões verticais não sofrem grandes alterações com a variação do parâmetro  $\phi'$ .



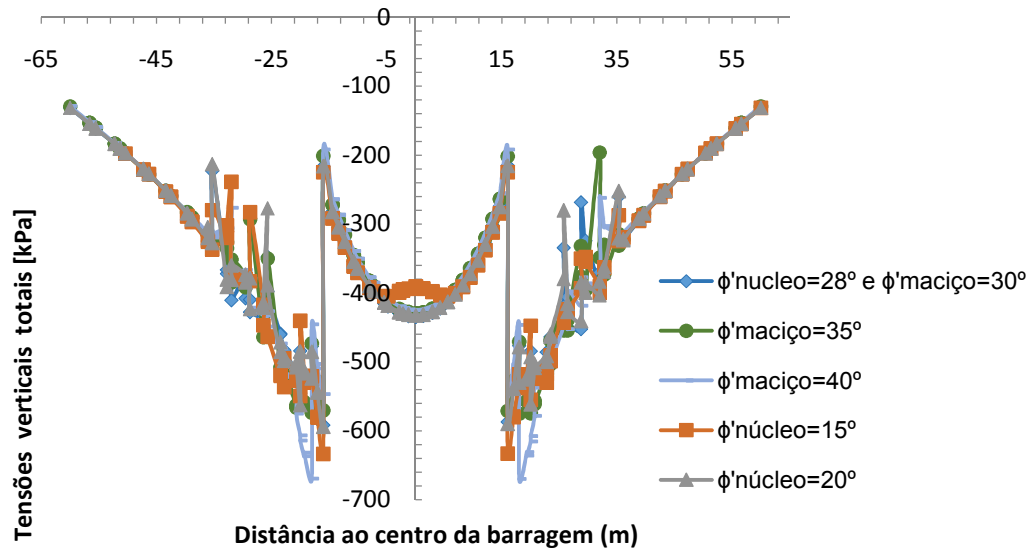


Fig. 4.14 Tensões verticais totais ao longo da barragem numa secção de altura igual a 15 metros em função de  $\phi'$

#### 4.3.3 Índice de arco, $a_r$

Do estudo efectuado no ponto anterior relativamente às tensões verticais na barragem não se espera que  $\phi'$  seja um parâmetro com grande influência no efeito de arco, ainda assim, esperam-se que os casos em que  $\phi'_{\text{maciço}}=40^\circ$  e  $\phi'_{\text{núcleo}}=15^\circ$  sejam aqueles que representem maiores diferenças em relação ao caso base. Na Fig 4.15 apresenta-se o índice de arco em função da altura da barragem para a variação de  $\phi'$ .

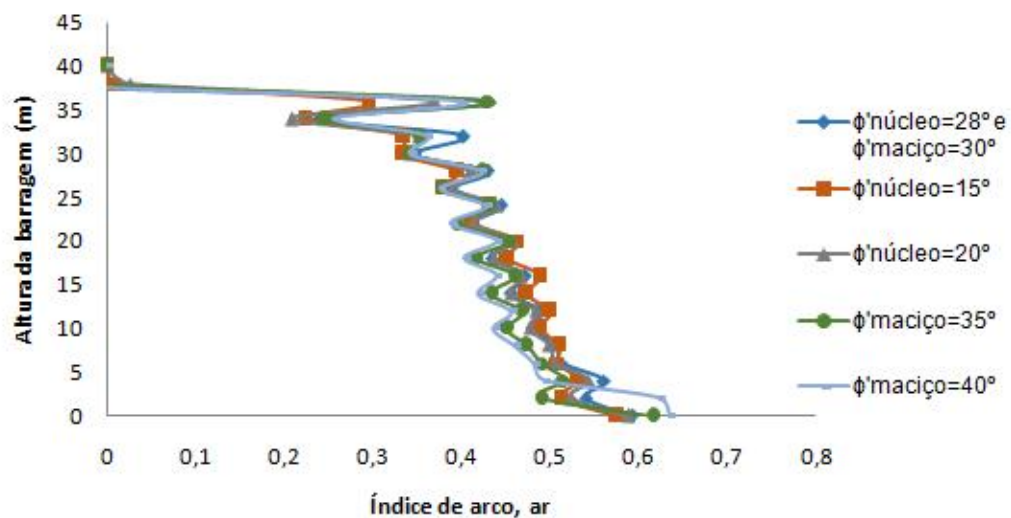


Fig. 4.15 Efeito de arco em função de  $\phi'$

Por observação da figura conclui-se que a variação deste parâmetro não tem grande influência no efeito de arco quando este é medido junto ao material do filtro. Tal como se esperava o caso para o qual  $\phi'_{\text{maciço}}=40^\circ$  é o caso com maior efeito de arco, excepto para a base da barragem. Para uma altura superior a 2/3 da barragem os valores são praticamente iguais.

De seguida, na Fig. 4.16 apresenta-se o estudo do efeito de arco ao longo do eixo horizontal da barragem para os 15 metros de altura. Uma vez que relativamente à secção analisada junto ao filtro não existem grandes diferenças, esta figura permite ter uma noção relativamente à influência deste parâmetro no resto do corpo da barragem.

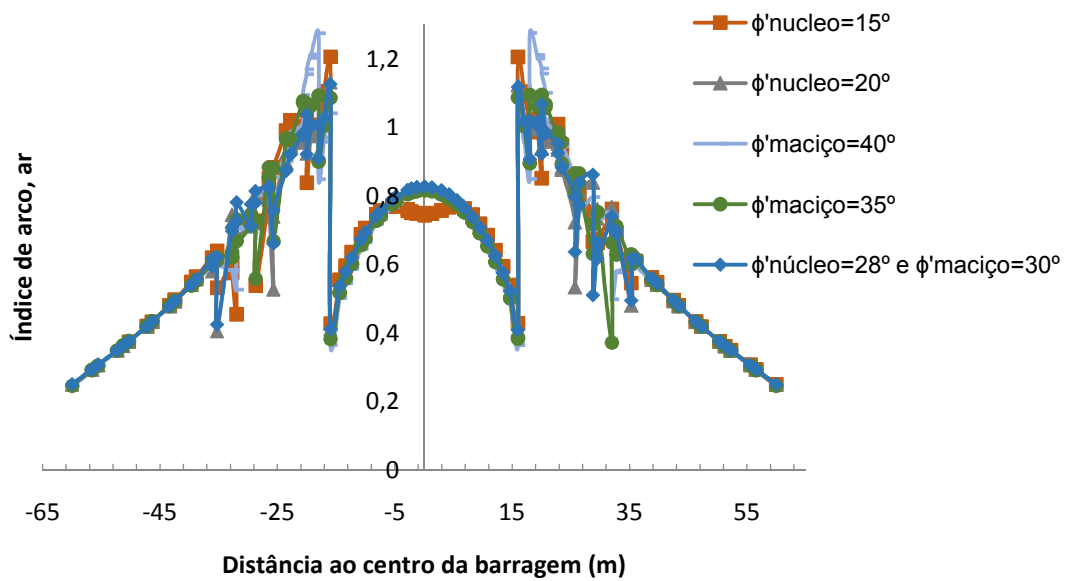


Fig. 4.16 Efeito de arco ao longo do eixo horizontal da barragem para uma altura de 15 metros para  $\phi'$

Analisando a figura tem-se que de um modo geral não existem grandes diferenças considerando todos os casos, dado que as linhas correspondentes a cada caso encontram-se praticamente sobrepostas. Verifica-se que existem diferenças no centro do núcleo para o caso em que  $\phi'_{\text{núcleo}}=15^\circ$ , este apresenta um efeito de arco maior quando comparado com os restantes, mas trata-se de uma diferença inferior a 0.1.

Deste estudo podemos concluir que o ângulo de resistência ao corte tem pouca influência no efeito de arco. Tendo uma maior influência para valores mais baixos de  $\phi'_{\text{núcleo}}$  quando medido na linha central do núcleo. Refira-se ainda que neste ponto não se fez um estudo comparativo com os autores do capítulo dois, pois estes estudaram a variação deste parâmetro no filtro, no núcleo e na vala corta-águas.

## 4.4 Influência da Inclinação dos taludes do núcleo

### 4.4.1 Generalidades

No capítulo dois, concluiu-se que este parâmetro tem uma grande influência no efeito de arco e que, quanto mais inclinados forem os taludes do núcleo da barragem maior será o efeito de arco nesta.

O estudo da influência deste parâmetro foi feito mantendo constantes a largura de coroamento e a altura da barragem, alterando-se a inclinação dos taludes do núcleo para as relações de: 1V:1H, 4V:1H e 6V:1H, tendo por base de comparação o caso base com uma inclinação de 2V:1H como indicado na Tabela 4.1. A geometria destes casos observa-se na Fig. 4.17.

Refira-se ainda que neste caso a secção junto ao filtro tem inclinações diferentes pelo que a análise às tensões verticais é feita em quatro secções diferentes. Todas estas secções foram definidas com uma distancia do filtro da barragem igual a 3 metros.

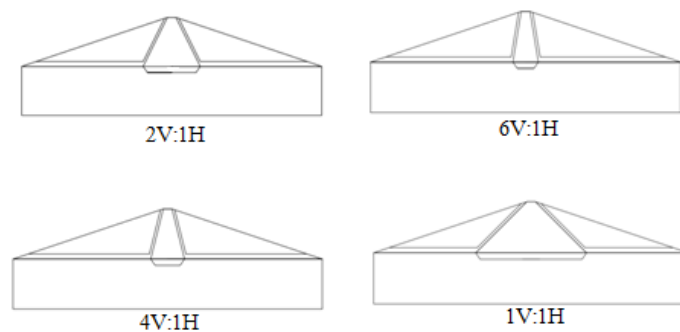


Fig. 4.17 Geometria dos casos analisados para a influência da inclinação do núcleo.

### 4.4.2 Tensões Verticais Totais

Das Fig. 4.18 a Fig. 4.21 apresentam-se os contornos da distribuição de tensões verticais totais no corpo da barragem e fundação, considerando o caso base e as várias inclinações em estudo.

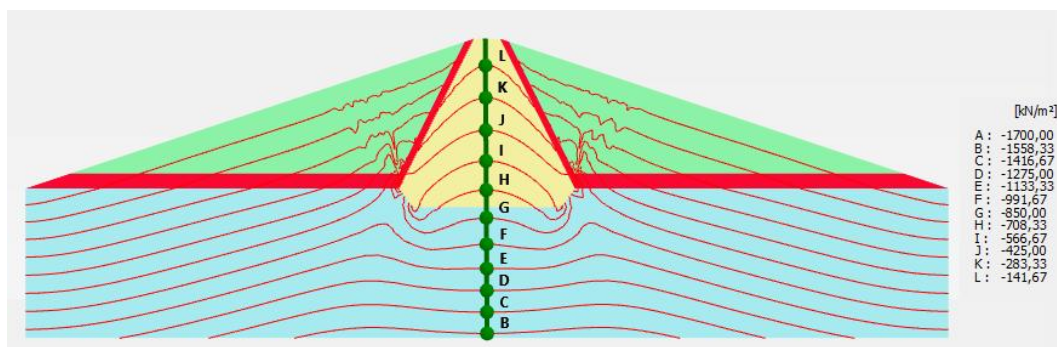


Fig. 4.18 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso base

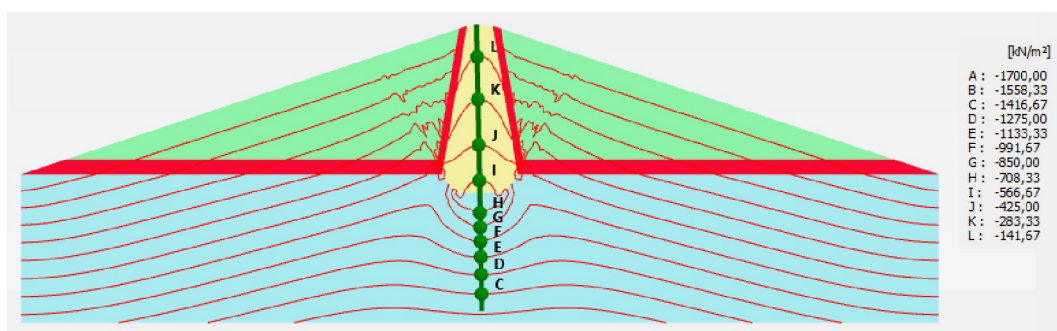


Fig. 4.19 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso 6V:1H

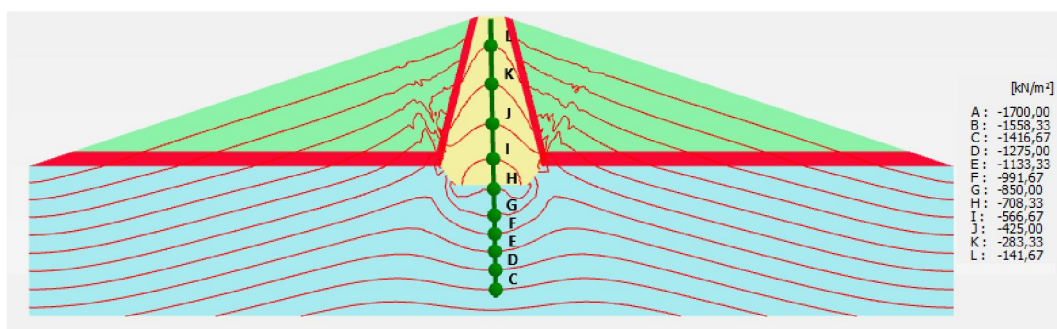


Fig. 4.20 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso 4V:1H

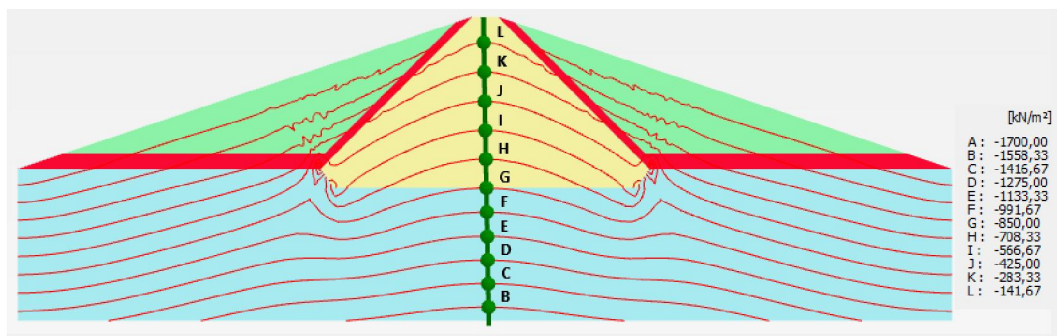


Fig. 4.21 Contorno de distribuição das tensões verticais totais no corpo da barragem para o caso 1V:1H

Da observação destas figuras conclui-se que as tensões verticais diminuem bastante no centro do núcleo conforme os taludes do núcleo são mais inclinados. Por exemplo, observe-se a linha correspondente ao ponto I, na situação em que os taludes do núcleo têm menor inclinação, ou seja, uma inclinação de 1V:1H, esta encontra-se a cerca de 1/3 da altura total da barragem, à medida que o núcleo se torna mais vertical esta vai descendo, até que, quando 6V:1H está mais próxima da base da vala corta-águas. Observa-se uma diminuição de tensões mais acentuada entre 1/3 e 2/3 da altura da barragem, ao passo que junto ao coroamento as tensões mantêm-se em níveis praticamente iguais. Junto ao filtro, do lado do maciço também se verificam diferenças nos vários casos, existe um aumento de tensões devido à transferência de tensões do núcleo para o maciço, esta diferença é mais evidente quando comparados o caso 1H:1V com os restantes.

A Fig. 4.22 relaciona as diferentes tensões verticais retiradas para cada caso de inclinação do núcleo, ao longo da altura da barragem, com as tensões verticais teóricas.

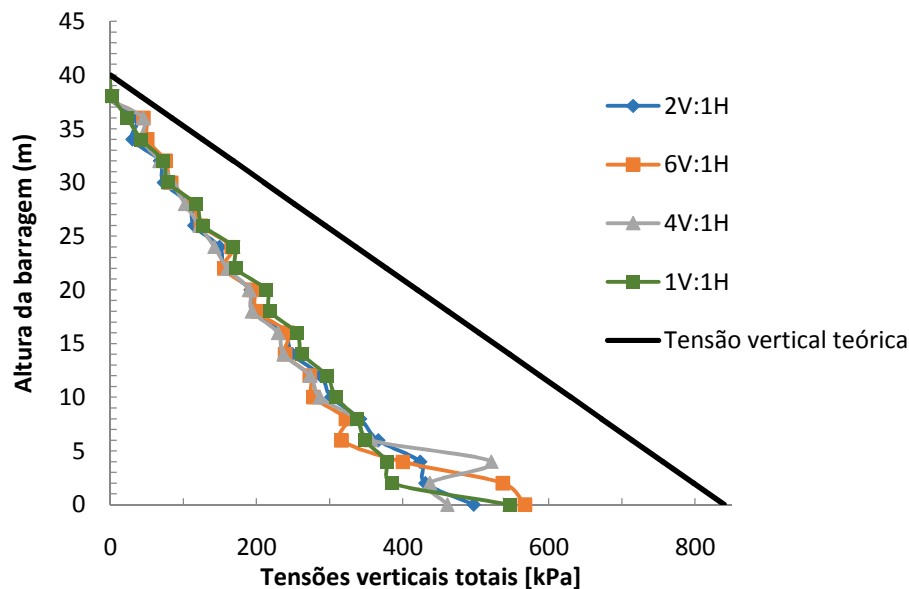


Fig. 4.22 Comparação das tensões verticais totais e das tensões verticais teóricas em função da altura da barragem para o estudo da influência da inclinação do núcleo

Da observação Fig. 4.22 pode concluir-se que, junto ao filtro, as tensões não são tão influenciadas pela inclinação do núcleo. Entre 1/3 e 2/3 da altura da barragem existe maior variação e os casos que apresentam menores tensões são 6V:1H e 4V:1H, ou seja, os núcleos com os taludes mais inclinados. Junto à base da barragem temos que o caso em que os taludes do núcleo são menos inclinados apresenta maiores valores de tensões verticais quando comparado com os restantes.

Por forma a aferir a influência da inclinação dos taludes do núcleo ao longo da barragem apresenta-se a Fig. 4.23, esta representa as tensões verticais totais para uma altura de 15 metros, ao longo do eixo horizontal da barragem, passando por todos os materiais que a compõe.

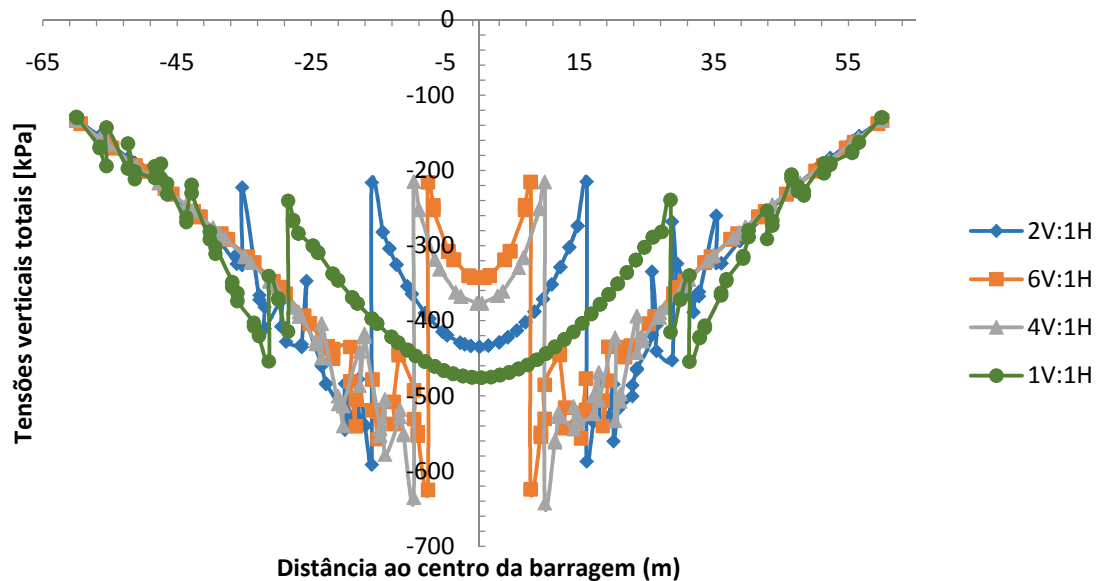


Fig. 4.23 Tensões verticais totais ao longo da barragem numa secção de altura igual a 15 metros em função da inclinação do núcleo.

Numa primeira análise à Fig. 4.23 pode verificar-se uma grande variação do efeito de arco entre os vários casos estudados, pois a mudança da geometria do núcleo provoca grandes oscilações nas tensões totais da barragem. No centro do núcleo observa-se uma diferença na ordem dos 200 kPa entre o caso que apresenta menores tensões (6V:1H) e o caso que apresenta maiores tensões (1V:1H). Tal como a Fig. 4.22 já mostrava, junto ao filtro a diferença de valores é menor, observando-se que os valores são bastante próximos uns dos outros. Para os casos que apresentam tensões inferiores no núcleo (6V:1H e 4V:1H) observa-se um aumento das tensões no maciço junto ao filtro que evidencia a existência de transferência de tensões. Conclui-se que quanto maior for a inclinação dos taludes do núcleo, menores as tensões totais observadas, da mesma forma que se torna obvio que núcleos com menores inclinações apresentam maiores valores para as tensões verticais totais.

Refira-se ainda que embora se observem maiores diferenças de tensões no centro do núcleo da barragem, os valores para as tensões verticais são sempre inferiores a estes junto ao filtro, pelo que se espera sempre que o efeito de arco avaliado junto ao filtro seja superior ao existente no centro do núcleo.

#### 4.4.3 Índice de arco, $a_r$

Na Fig. 4.24 apresenta-se o índice de arco em função da altura da barragem para as diferentes inclinações dos taludes do núcleo.

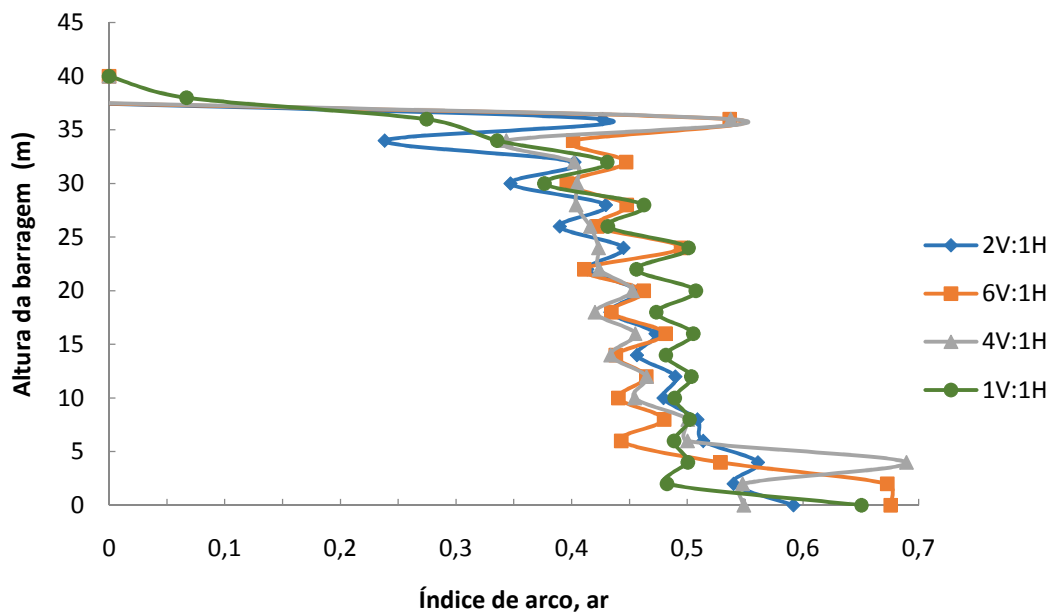


Fig. 4.24 Índice de arco em função da inclinação do núcleo

A análise anteriormente feita às tensões verticais totais evidenciava um menor efeito de arco para um núcleo com taludes menos inclinados. Por observação da Fig. 4.24, verifica-se que excepto junto à base da barragem o efeito de arco para este caso é sempre inferior. Da observação da figura tem-se ainda que entre 1/3 e 2/3 da altura da barragem a situação mais gravosa corresponde sempre a taludes do núcleo mais inclinados, sendo que o caso em que 6V:1H é o que apresenta maior efeito de arco. A partir desta altura, o caso base apresenta maior efeito de arco que os restantes, chegando a atingir valores inferiores a 0,4. De um modo geral, núcleos com taludes mais inclinados geram um maior efeito de arco.

Da figura retira-se ainda para uma altura de 22 metros valores de índice de arco de 0,41, 0,43 e 0,47 para as inclinações de 6V:1H, 4V:1H e 1V:1H respectivamente. Para o caso base, à mesma altura, o valor de  $a_r$  é igual à inclinação de 4V:1H.

Na Fig. 4.25 tem-se o índice de arco ao longo de uma secção transversal da barragem para uma altura de 15 metros, considerando as diferentes inclinações do núcleo.

Da observação da Fig. 4.25 conclui-se que no centro do núcleo há uma clara diferença entre as várias inclinações, existindo uma diferença no índice de arco, do núcleo mais horizontal para o mais vertical na ordem dos 0,3. Esta diferença é evidente também à medida que se aproxima do material do filtro, por exemplo, aos 5 metros de distância do centro da barragem observa-se uma diferença entre o caso 6v:1H e 1V:1H que chega aos 0,5. Os valores correspondentes aos casos em que a inclinação do núcleo é igual a 6V:1H e 4V:1H apresentam menores diferenças de valores entre eles, sendo inferiores a 0,1. Esta figura permite ver que o efeito de arco é claramente influenciado pela inclinação dos taludes do núcleo e que núcleos mais verticais apresentam maior efeito de arco.



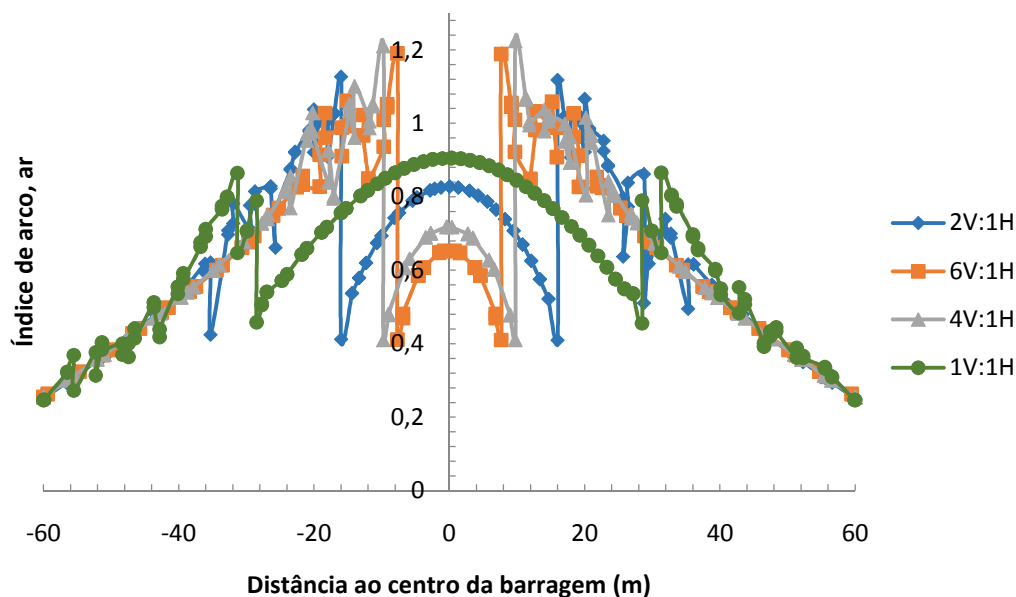


Fig. 4.25 Efeito de arco ao longo do eixo horizontal da barragem para uma altura de 15 metros para a influência da inclinação do núcleo

Por forma a comparar os estudos analisados no capítulo dois com o presente estudo, relembrem-se os valores obtidos na Tabela 2.3 e observem-se os valores obtidos neste capítulo na Tabela 4.2.

Tabela 4.4 Resumo dos valores obtidos para as várias inclinações do núcleo

Inclinação	$a_r$	H	% de Altura
2V:1H	0.43	22	55
6V:1H	0.41		
4V:1H	0.43		
1V:1H	0.47		

Considerando os estudos anteriores referidos, tem-se que estes apresentavam maiores efeitos de arco para uma altura de barragem aproximadamente igual a 60% da altura total, e em ambos se concluiu que o efeito de arco é superior para núcleos com taludes de maior inclinação. Tendo em conta os valores obtidos no presente estudo, estes também concluem que quanto mais vertical for o núcleo maior o efeito de arco na barragem, sendo que, do caso em que a inclinação é igual a 6V:1H para o caso 4V:1H não se observam grandes alterações, podendo ser um indicador de que a partir de um certo valor o núcleo ser ainda mais vertical não provoca um acréscimo considerável de efeito de arco. Os valores obtidos neste estudo quando comparados com os valores obtidos nos estudos de Talebiet al. (2013) e Ghafariet al. (2015) apresentam valores semelhantes, sendo que, deve ter-se em conta que os valores obtidos no estudo do primeiro autor são superiores por se tratar de uma barragem de enrocamento.



## 4.5 Altura da barragem

### 4.5.1 Generalidades

O objectivo do estudo da altura da barragem tem por base perceber se o efeito de arco é mais notório em barragens de maiores dimensões ou em barragens mais pequenas. Uma vez que em nenhum dos estudos analisados se abordou este parâmetro optou-se por estudar um caso que considera uma altura de 20 metros mantendo as propriedades dos materiais da barragem estudada no caso base.

### 4.5.2 Tensões Verticais Totais

Apresentam-se as Fig. 4.26 e Fig. 4.27 estas representam o contorno da distribuição de tensões verticais.

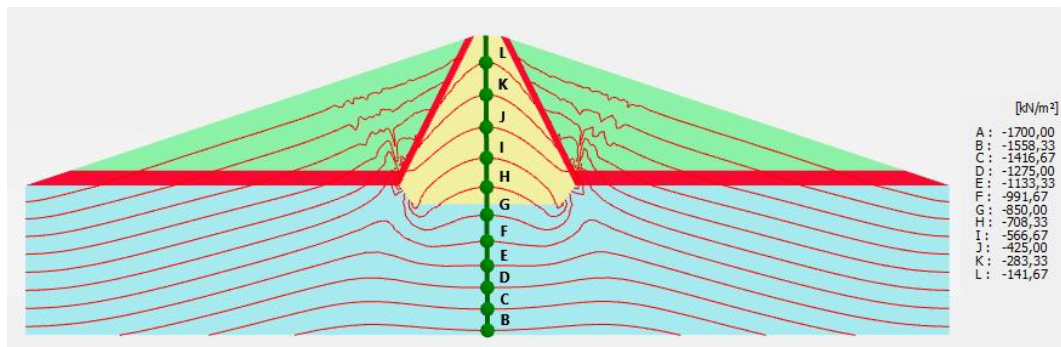


Fig. 4.26 Contorno de distribuição de tensões verticais totais para uma altura de 40 metros

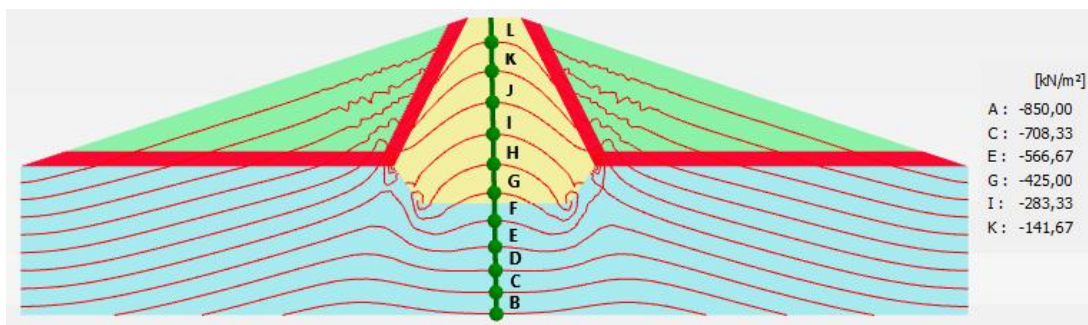


Fig. 4.27 Contorno de distribuição de tensões verticais totais para uma altura de 20 metros

Da observação da Fig. 4.27 temos uma diferença de tensões entre o núcleo da barragem e o maciço um claro indicador da existência de efeito de arco. Não é possível fazer uma

comparação entre as Fig. 4.26 e Fig. 4.27 pois não apresentam a mesma altura, logo as tensões também vão variar de um caso para o outro. Por forma a criar um termo de comparação, na Fig. 4.28 apresentam-se as tensões verticais totais e teóricas para as alturas de 20 e 40 metros tendo em conta uma altura adimensional.

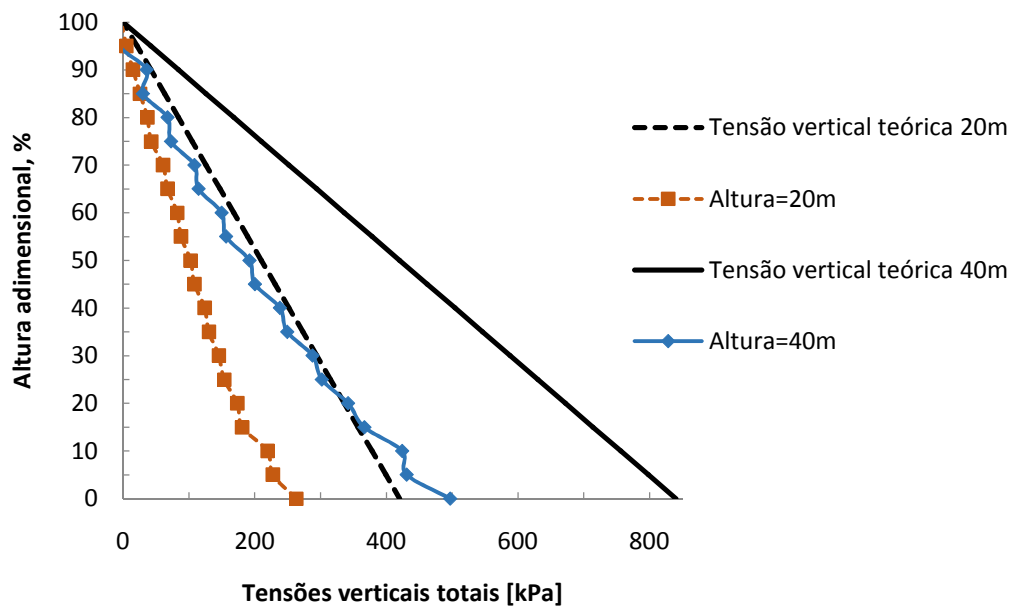


Fig. 4.28 Comparação das tensões verticais totais e das tensões verticais teóricas em função de uma altura dimensional

Da observação da Fig. 4.28 tem-se que na base da barragem a diferença de tensões entre a tensão medida computacionalmente e a tensão teórica para o caso de 20 metros é de cerca de 200kPa, e para os 40 metros de altura, esta diferença é aproximadamente de 400 kPa, uma vez que os materiais que compõe a barragem são os mesmos a razão entre as tensões teóricas de um caso e de outro é de 2, isto significa que entre os dois casos, na base da barragem não se irão encontrar grandes diferenças. Mas, ao se analisarem as tensões a 50% da altura da barragem, tem-se que, para uma altura de 20 metros se lê uma tensão vertical de 150kPa, tendo-se para a teórica cerca de 210kPa, o que representa 70% desta. Quando considerada a mesma situação para os 40m tem-se que as tensões verticais representam menos de 50% das teóricas. Daqui se conclui que, na base da barragem podem não existir grandes diferenças mas que estas se esperam maiores ao longo da altura da barragem.

Para a observação das tensões verticais totais ao longo da barragem em ambos os casos desenhou-se uma secção a 7,5 metros de altura no caso em que se considera a barragem a 20 metros por forma a ser equivalente a zona de comparação de resultados.

Na Fig. 4.29 apresenta-se a distribuição de tensões verticais totais ao longo do eixo horizontal da barragem considerando uma secção a 7,5 metros de altura, para o caso em que a altura da barragem é igual a 20 metros, e uma secção a 15 metros de altura para o caso base analisado.

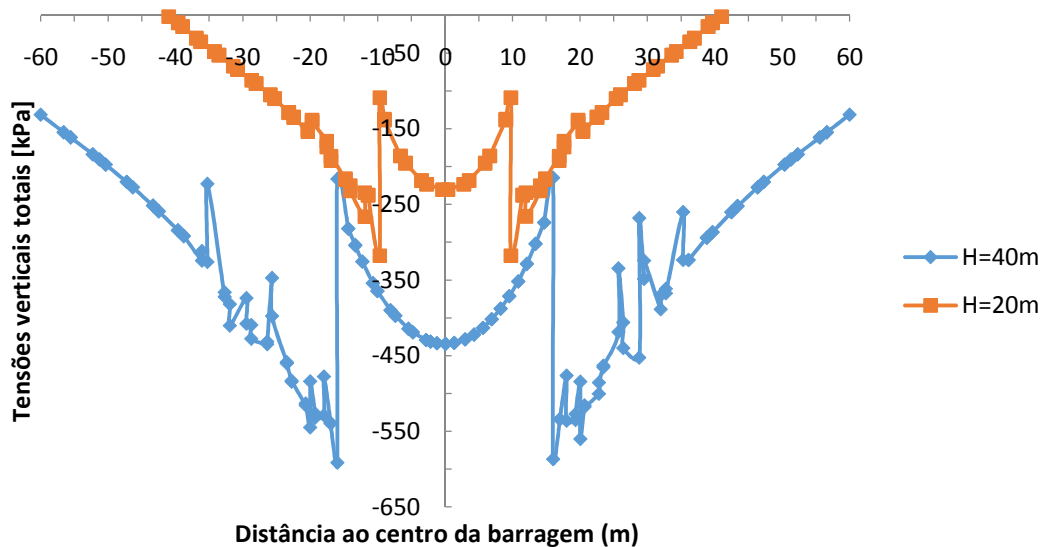


Fig. 4.29 Tensões verticais totais ao longo da barragem numa secção de altura igual a 37.5% da altura total das barragens.

Da observação da Fig. 4.29 salienta-se a clara diferença de tensões quando considerados os centros do núcleo de cada uma das barragens, a diferença de tensões entre o centro do núcleo da barragem com 20 metros e as tensões do maciço é inferior à diferença das mesmas quando considerada a barragem de 40 metros. Relativamente ao restante núcleo é complicado fazer comparações pois o comprimento das barragens não é igual, pelo que a largura dos núcleos também não coincide, o que é visível na figura.

#### 4.5.3 Índice de arco, ar

Na Fig. 4.30 apresenta-se o índice de arco para as alturas de 40 e 20 metros recorrendo a uma altura adimensional.

Relativamente à Fig. 4.30 conclui-se que tal como era esperado na base da barragem não existem diferenças significativas entre os dois casos. Sendo que estas diferenças tornam-se mais evidentes entre os 30 e os 80% da altura total da barragem. Ainda assim, para os casos estudados estas diferenças andam sempre na ordem dos 0,1. Daqui se conclui que o efeito é maior para barragens com maior altura.

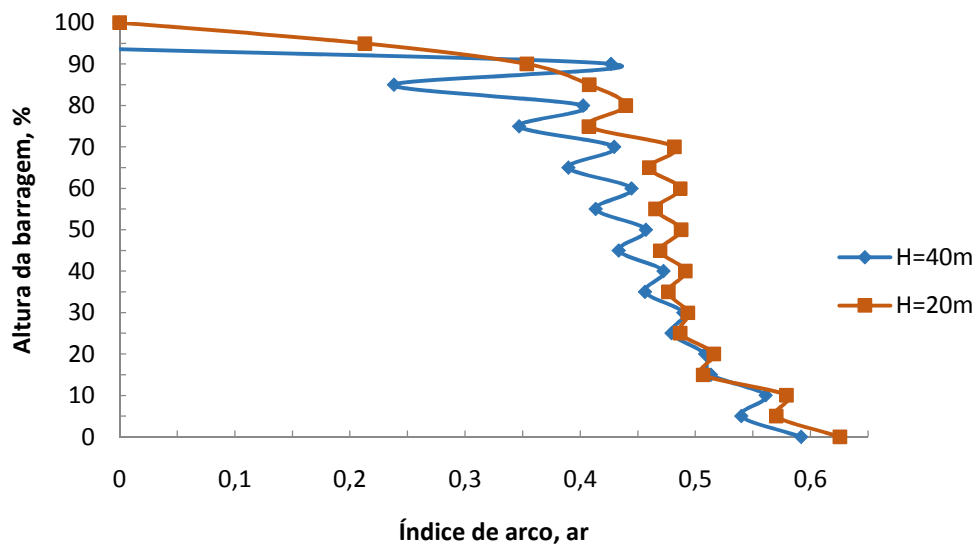


Fig. 4.30 Índice de arco em função de uma altura adimensional

Da análise às tensões verticais na Fig. 4.29 percebeu-se a dificuldade em comparar valores, pois as alturas das barragens não são iguais. Assim, na Fig. 4.31 apresenta-se o índice de arco calculado em função das alturas adimensionais. Contabilizaram-se para este cálculo as tensões teóricas correspondentes a uma altura igual a 37,5% da altura total da barragem para ambos os casos.

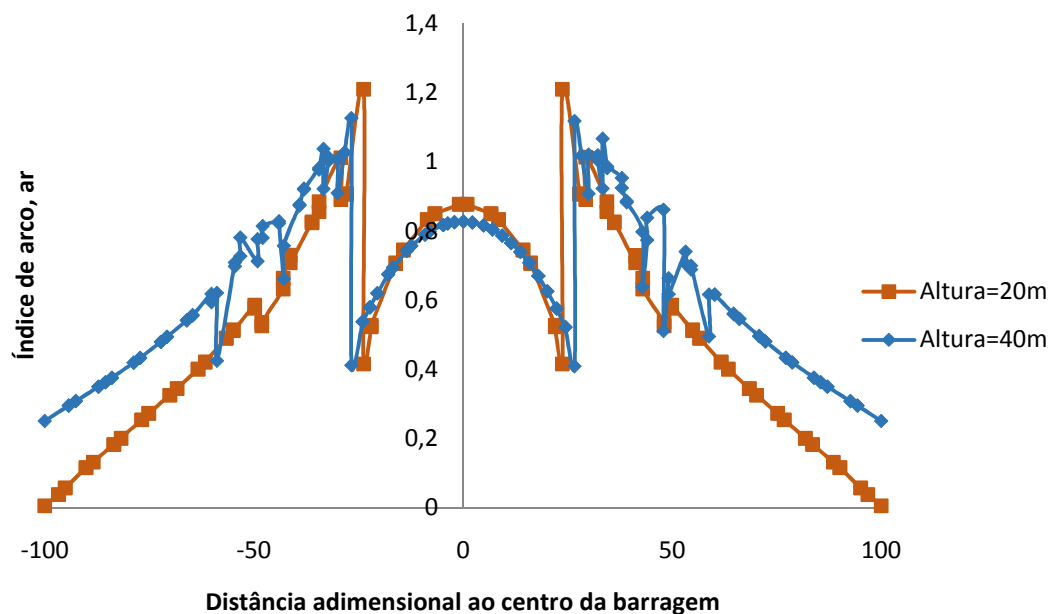


Fig. 4.31 Índice de arco ao longo da barragem para uma altura adimensional

Considerando a Fig. 4.31 conclui-se que a altura não tem uma grande influência no efeito de arco da barragem. Existem diferenças entre barragens de maior altura e as barragens de menor altura, e, como se referiu o efeito de arco é menor em barragens mais pequenas, no entanto, esta não é uma diferença significativa.

#### 4.6 Análise de resultados

Neste ponto realiza-se uma análise de resultados dos casos estudados referente à influência no efeito de arco provocada pela deformabilidade do maciço e núcleo, do ângulo de resistência ao corte e da variação da inclinação dos taludes do núcleo. Relativamente à influência da altura da barragem concluiu-se anteriormente que este não é dos parâmetros com maior influência neste efeito.

Relembre-se que os valores considerados para o caso base são:  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}=8$ ,  $\phi'_{\text{maciço}}=35^\circ$ ,  $\phi'_{\text{núcleo}}=28^\circ$  e uma inclinação de 2V:1H para os taludes do núcleo.

Para efeitos de comparação de resultados, nesta análise limitaram-se os gráficos para valores correspondentes ao índice de arco entre 0,2 e 0,8, uma vez que abrange a maioria dos valores obtidos e para que se possa aferir qual o caso mais condicionante.

Comece-se por comparar os valores do índice de arco obtidos para a variação da relação  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$  com a variação do ângulo de resistência ao corte. A Fig. 4.32 apresenta a variação do índice de arco ao longo da altura da barragem para os casos atrás referidos. Esta figura é resultado da junção das Fig. 4.6 e Fig. 4.15 analisadas anteriormente.

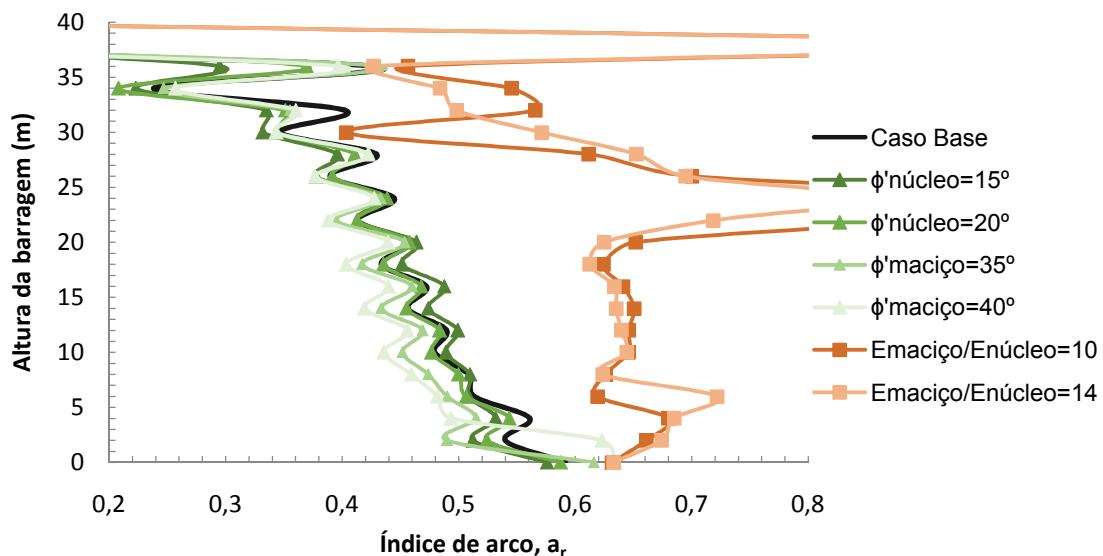


Fig. 4.32 índice de arco  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$  vs  $\phi'$

Da figura resulta que a variação do ângulo de resistência ao corte não introduz diferenças significativas ao caso base, enquanto que a variação da relação das deformabilidades do maciço e do núcleo é o parâmetro que introduz maiores alterações relativamente ao caso base, com os valores do índice de arco superiores, verificando-se menor efeito de arco.

A Fig. 4.33 apresenta o índice de arco ao longo da altura da barragem para os casos referentes à variação da deformabilidade do maciço e do núcleo e à variação da inclinação dos taludes do núcleo.

Da observação desta, conclui-se, à semelhança do gráfico anterior, o efeito de arco não se altera significativamente com a variação da inclinação dos taludes do núcleo, enquanto que, para a variação da relação de deformabilidade entre o maciço e o núcleo apresenta valores superiores para o índice de arco.

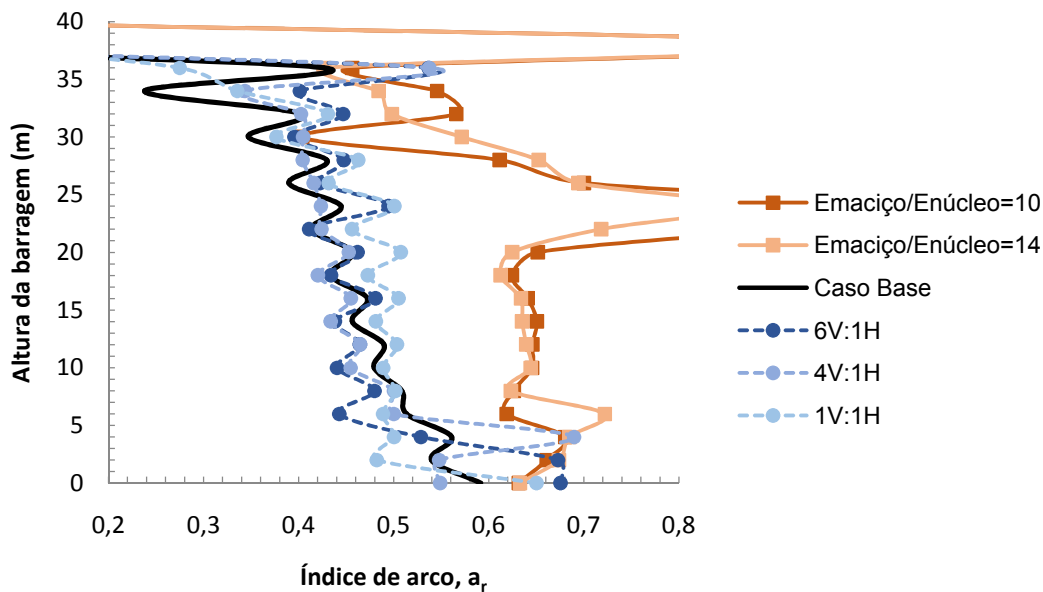
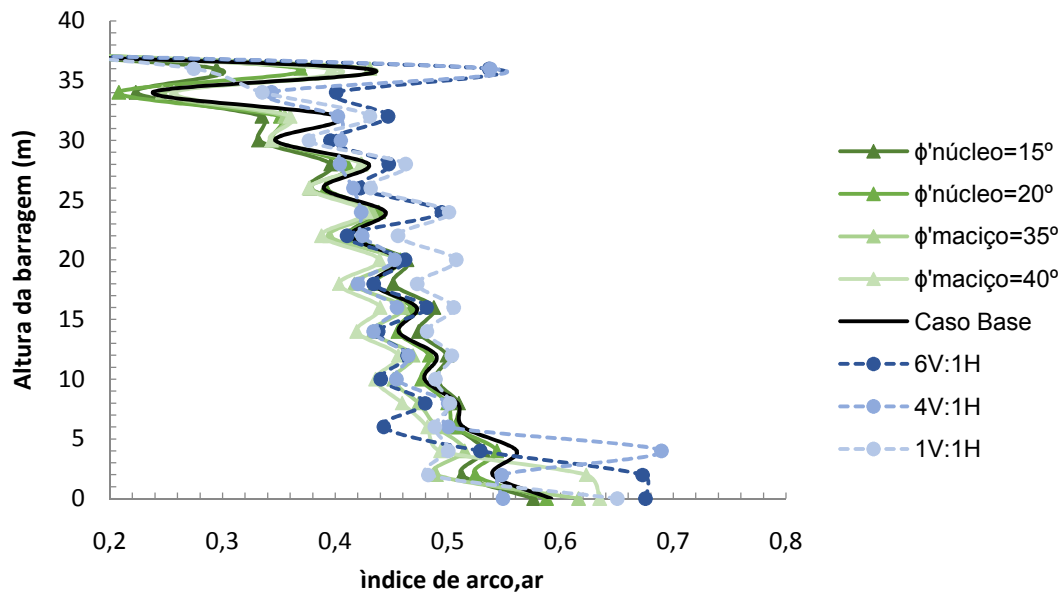


Fig. 4.33 Índice de arco  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$  vs inclinação do núcleo

Das Fig. 4.32 e Fig. 4.33 conclui-se que quando se compara a variação do efeito de arco em altura para os parâmetros, os efeitos de arco para as variações de  $\phi'$  e da inclinação do núcleo diminuem linearmente desde o coroamento à base da barragem, enquanto que esse tipo de variação não existe quando considerada a variação de  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$ , verificando-se mesmo que o efeito de arco é praticamente constante até meia altura da barragem.

Tendo-se concluído que, relativamente à variação das deformabilidades dos materiais, quer a variação da inclinação dos taludes do núcleo, quer a variação das características de resistência ao corte dos materiais apresentam valores superiores do efeito de arco, comparam-se estes dois parâmetros na Fig. 4.34.

Fig. 4.34 Índice de arco:  $\phi'$  vs inclinação dos taludes do núcleo

Nesta comparação, consegue observar-se que o efeito de variação da resistência ao corte é mais condicionante na parte superior da barragem, ao contrário da parte inferior em que é mais condicionante a variação da inclinação dos taludes do núcleo. Esta afirmação é corroborada com os exemplos apresentados Tabela 4.5 em que são apresentados os valores médios de índice de arco, para ambos os parâmetros, retirados da Fig. 4.34 para as alturas de 30 e de 5 metros a partir da base da barragem.

Tabela 4.5 valores médios de índice de arco para  $\phi'$  e inclinação dos taludes do núcleo

Altura da barragem (m)	$\phi'$	Inclinação do núcleo
30	0.35	0.4
5	0.55	0.5

A análise da tabela revela ainda que o índice de arco aumenta em profundidade a uma taxa superior para a variação da inclinação do núcleo. Para os vários parâmetros analisados e comparando-os com o caso base tem-se que os maiores valores de índice de arco ocorrem quando se varia a relação entre as deformabilidades do maciço e do núcleo ou seja, apresenta menor efeito de arco.

Relativamente à comparação com outros autores, apenas Talebiet al. (2013) realizou estudos paramétricos relativamente à variação da relação de deformabilidade  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$  e à variação da inclinação do núcleo (Fig. 2.2 e Fig. 2.4). O autor também conclui que o efeito de arco

diminui em profundidade (desde o coroamento até à base) para ambos os parâmetros, tendo concluído também que o efeito de arco é mais condicionante quando se varia a relação dos módulos de deformabilidade dos materiais. Esta seria a conclusão esperada para este tipo de estudo uma vez que o efeito de arco se caracteriza essencialmente pela diferença de rigidez do material do núcleo da barragem para o material dos maciços.

Neste estudo obteve-se uma conclusão contrária à obtida nos estudos bibliográficos. Apresentando um maior efeito de arco para a relação  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$  com menor valor, ao contrário de estudos anteriores onde se verifica um maior efeito de arco, quanto maior for o valor desta relação. No entanto, como referido anteriormente, a análise do autor é feita para barragens com maciços estabilizadores de enrocamento onde se espera que o efeito de arco seja superior comparativamente a barragens com maciços estabilizadores de terra.

Refira-se ainda que no presente trabalho foi considerada a existência de uma vala corta-águas e que, de certo modo, esta tem influência no comportamento da estrutura e no efeito de arco, uma vez que se trata de um material mais deformável que o material que compõe a fundação.





## 5 Considerações finais

### 5.1 Conclusões

Neste trabalho estudou-se o efeito de arco numa barragem de terra zonada. A importância deste estudo prende-se com o facto de este tipo de fenómeno poder provocar uma rotura eminente, ou seja, não existe qualquer sinal que possa anunciar a existência de risco de fraturação hidráulica.

Embora o estudo deste fenómeno e toda a bibliografia existente surjam mais ligados a barragens de enrocamento, até porque o efeito de arco assume maiores dimensões para este tipo de barragem, o facto de surgir também associado a barragens de terra levou ao seu estudo, apresentando este trabalho um pequeno passo no estudo deste fenómeno.

Nos vários estudos da bibliografia encontram-se diferentes expressões para traduzir efeito de arco. Assim, algumas expressões foram convertidas, quando necessário, de modo a obter a mesma medida do efeito de arco definido pelos diferentes autores. Para obter o efeito de arco, os autores adoptaram diferentes secções de estudo, pelo que se procedeu ao estudo deste efeito nas várias secções, tendo-se chegado à conclusão que este é maior, comparando tensões, junto aos materiais do filtro. Dos vários estudos paramétricos para definição de quais os parâmetros geométricos ou características do solo que mais influenciam este efeito distinguem-se: módulo de deformabilidade do maciço, núcleo, fundação e filtro, a inclinação dos taludes do núcleo, a inclinação dos taludes dos maciços a montante e jusante, a espessura do filtro e o ângulo de resistência ao corte do filtro e da vala corta-águas.

Por forma a comparar e corroborar alguns estudos apresentados, apresentou-se um caso de estudo de uma barragem de terra zonada com 40 metros de altura. Este caso base serviu de estudo para as opções a tomar antes de estudar o efeito de arco, nomeadamente relativamente ao tempo de consolidação a adoptar e à consideração durante a fase de construção de um estado de saturação dos materiais. Dos vários estudos efectuados optou-se por um tempo de consolidação igual a 15 dias e, concluiu-se ainda que a consideração de um estado de consolidação dos materiais influencia o comportamento da barragem, induzindo a maiores tensões e consequentemente, também a um maior efeito de arco. Utilizou-se o programa Plaxis, modelando uma construção faseada, por camadas, obtendo os deslocamentos e tensões ao longo da altura da barragem.

O estudo paramétrico com a alteração de parâmetros geomecânicos e geométricos, nomeadamente a variação do módulo de deformabilidade do maciço e núcleo, ângulos de resistência ao corte do maciço e núcleo, a variação da inclinação dos taludes do núcleo e foi ainda analisada uma barragem com uma altura de 20 metros, para aferir a influência deste efeito em pequenas barragens. Relativamente à variação da relação  $E_{\text{maciço}}/E_{\text{núcleo}}$  concluiu-se que quanto menor o valor desta relação menor o efeito de arco na estrutura. Mantendo o valor para  $\phi'_{\text{núcleo}}$  inalterado e variando os ângulos de resistência ao corte no maciço, concluiu-se que quanto maior este ângulo, maior o efeito de arco observado na barragem, já o contrario, a fixação de  $\phi'_{\text{maciço}}$  e diminuição do valor de  $\phi'_{\text{núcleo}}$  não apresenta tanta influência no efeito de

arco. Concluiu-se ainda que quanto mais vertical for o núcleo da barragem maior o efeito de arco observado. Do estudo realizado à influência da altura da barragem no efeito de arco, concluiu-se que este não é um parâmetro que traduza uma grande influência no efeito de arco, no entanto, refere-se que ainda assim se concluiu que o efeito de arco é maior para barragens com maior altura.

De acordo com a bibliografia estudada esperava-se que a maior diferença entre os módulos de elasticidade do núcleo e do maciço correspondesse a um maior efeito de arco o que não se verificou neste trabalho. Por outro lado, e como era esperado verificou-se que núcleos com maiores inclinações induzem a um maior efeito de arco na barragem.

Do estudo paramétrico realizado neste trabalho e da comparação dos vários resultados obtidos para o efeito de arco, concluiu-se que o efeito de variação da resistência ao corte é mais condicionante na parte superior da barragem, ao contrário da parte inferior em que é mais condicionante a variação da inclinação do núcleo. Concluindo-se ainda que o parâmetro com maior influência no efeito de arco é a relação entre o módulo de deformabilidade do maciço e do núcleo, uma vez que a diferença entre a rigidez dos materiais provoca uma maior transferência de tensões para os maciços estabilizadores.

## 5.2 Desenvolvimentos futuros

O estudo do efeito de arco em barragens de terra é ainda um campo pouco explorado. Assim, sugere-se a realização destes estudos para barragens de maiores dimensões, considerando para secção de cálculo de tensões além da utilizada neste trabalho, também a linha central do núcleo pois, para determinados parâmetros observaram-se maiores diferenças nesta secção.

Sugere-se, no estudo paramétrico, a combinação de vários parâmetros, como por exemplo, para os vários ângulos de resistência ao corte estudados, alterar-se também as características de deformabilidade, da mesma forma que se podem alterar para as diferentes inclinações estudadas o ângulo de resistência ao corte. Desta forma, consegue-se uma consideração mais abrangente da influência destes parâmetros no efeito de arco.

O modelo constitutivo de Mohr-Coloumb, utilizado na modelação do comportamento do solo deste trabalho, é um modelo limitado no que toca à consideração de saturação nos materiais pois não tem em conta o teor de água do solo. Existem modelos, tais como o Barcelona Basic Model (BBM) que consideram o teor de água dos solos e solos não saturados. Sugere-se a aplicação deste tipo de modelo na simulação da construção do aterro.

Por fim, a presença de água nas barragens é uma das maiores condicionantes da sua segurança. Assim, e como é considerada uma das fases mais críticas da construção de uma barragem, devido à possibilidade de fratura hidráulica, propõe-se o estudo do efeito de arco durante e após o primeiro enchimento. Refere-se que este enchimento deve ser simulado gradualmente por fases até se atingir a altura de água desejada para pleno armazenamento.

## Bibliografia

Almeida, P. (2013). *Análise de estabilidade de barragens de aterro em fase de esvaziamento*. Dissertação para obtenção do grau de mestre. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

Budhu, M. (2000). *Soil Mechanics and Foundations*. Wiley.

Costa, L. M., & Alonso, E. E. (2009). Predicting the behaviour of an earth and rockfill dam under construction. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* , 851-862.

Dantas, A., & Júnior, R. (2016). *Estudo e proposta de solução para o arqueamento de tensões com base na avaliação das barragens de Silveh - Irã e Karkhe - Irã*. Congresso Nacional de Geotenia e 8 Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia.

Djarwadi, D., Suryolelono, K. B., & Hardiyatmo, H. C. (2017). Effect of core clay configuration of the rock fill dams against hydraulic fracturing. *Procedia Engineering* 171 , 492-501.

Elmi, D., & Mirghasemi, A. A. (2013). Effects of arching on measurement of embedded pressure cell in embankment dam. *Seventh International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. Missouri University of Science and Technology.

Esmailzadeh, M., Talkhablou, M., & Ganjalipour, K. (2017). Arching parametric study on earth dams by numerical modeling: A case study on Darian Dam. *Indian Geotechnical Journal* .

Figueira, J. (2014). *O projecto, construção e desempenho de barragens de aterro com geossintéticos*. Dissertação para obtenção do grau de mestre. IST - Instituto Superior Técnico.

Genuchten, V. (1980). *A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils*.

Ghafari, A., Nikraz, H., & Sanaeirad, A. (2015). Finite element analysis of deformation and arching inside the core of embankment dams during construction. *Australian Journal of Civil Engineering* , 13-22.

Khanna, R., & Chitra, R. (2016). Hydraulic fracturing in core of earth and rockfill dams. *International Journal of Engineering Innovation & Research* , 136-142.

Lofquist, B. (1955). Discussion of Cracking in Dams. *5th ICOLD Conference*. Paris.

Lopes, S. (2016). *Barragens de Aterro - Ábacos de pré-dimensionamento para diferentes condições de esvaziamento*. Dissertação para obtenção do grau de mestre. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

Maksimovic, M. (1973). Optimal position if the central clay core of a rockfill dam in respect to arching and hydraulic fracture". *Internacional Congress on Large Dams* , (pp. 789-800).

- Marcelino, J. (2008). *Projecto, construção e exploração de pequenas barragens de aterro*. LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Nayebzadeh, R., & Mohammadi, M. (2011). The effect of impervious clay core shape on the stability of embankment dams. *Geotechnical and geological Engineering*, 627-635.
- Neves, E. M., Caldeira, L., & Pinheiro, A. d. (2015). *Projecto, construção e observação de pequenas barragens de aterro*. IST - Instituto Superior Técnico.
- Ormaz, A., & Vafaein, M. (2004). *Analysis of the parameters affecting the arching inside the earth dams core*.
- Quintas, F. (2002). *Planeamento da Construção de Barragens de Terra*. FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Regulamento de Segurança de Barragens (RSB). (2018).
- Sharma, H. (1991). *Embankment dams*. New Delhi: Oxford & IBH Pub. Co.
- Talebi, M., Vahedifard, F., & Meehan, C. (2013). Effect of geomechanical and geometrical factors on soil arching in zoned embankment dams. *Geo-Congress* (pp. 1056-1065). ASCE - American Society of Civil Engineers.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. New York: Wiley.
- USACE. (2004). *General design and construction considerations for earth and rock-fill dams*. Department of the Army - U.S Army Corps of Engineering.

# Anexo A

## A-Cálculo dos deslocamentos verticais

Ponto	Fase 3		Fase 4		Fase 5		Fase 6		Fase 7		Fase 8		Fase 9		Fase 10		Fase 11		Fase 12		Total
	PL	CL	PL	CL	PL	CL	PL	CL	PL	CL	PL	CL	PL	CL	PL	CL	PL	CL	PL	CL	
2	-0,031	-0,011	-0,018	-0,018	-0,019	-0,029	-0,019	-0,035	-0,019	-0,038	-0,019	-0,039	-0,02	-0,034	-0,021	-0,032	-0,017	-0,028	-0,007	-0,023	-0,477
6			-0,035	-0,021	-0,022	-0,033	-0,023	-0,046	-0,025	-0,055	-0,026	-0,053	-0,025	-0,043	-0,025	-0,048	-0,028	-0,043	-0,015	-0,036	-0,602
10					-0,04	-0,033	-0,029	-0,055	-0,035	-0,07	-0,037	-0,08	-0,044	-0,088	-0,052	-0,07	-0,048	-0,055	-0,026	-0,048	-0,81
14							-0,048	-0,056	-0,046	-0,087	-0,055	-0,105	-0,069	-0,113	-0,092	-0,107	-0,108	-0,087	-0,078	-0,06	-1,111
18									-0,067	-0,085	-0,07	-0,111	-0,09	-0,124	-0,119	-0,118	-0,14	-0,096	-0,101	-0,068	-1,189
22											-0,091	-0,105	-0,103	-0,125	-0,138	-0,124	-0,166	-0,106	-0,128	-0,075	-1,161
26													-0,125	-0,116	-0,153	-0,123	-0,183	-0,109	-0,144	-0,081	-1,034
30															-0,174	-0,112	-0,199	-0,11	-0,16	-0,083	-0,838
34																	-0,217	-0,098	-0,182	-0,082	-0,579
38																			-0,203	-0,072	-0,275
																				Total	-8,076

Figura A 1Deslocamentos verticais ao longo da altura da barragem, correspondentes ao caso "15 dias, sem saturação" da Fig. 3.4.

## Anexo B

B-Determinação das tensões totais verticais

Ponto	sem saturação							
	5 dias		10 dias		15 dias		20 dias	
	$\sigma_v$	$\sigma'_v$	$\sigma_v$	$\sigma'_v$	$\sigma_v$	$\sigma'_v$	$\sigma_v$	$\sigma'_v$
0	650,821	86,628	611,916	214,181	616,741	295,993	631,791	366,132
2	652,605	77,593	611,879	194,027	602,835	239,48	572,102	268,847
4	603,82	74,032	550,32	112,11	532,404	153,083	548,84	218,832
6	588,791	54,735	492,487	67,006	481,336	103,018	478,095	145,787
8	552,053	58,713	473,079	70,804	475,352	113,119	469,029	147,273
10	513,599	50,651	427,479	51,832	447,846	107,834	445,894	141,801
12	485,432	59,385	421,23	74,03	406,077	92,284	397,854	116,553
14	445,235	46,103	378,861	60,676	366,841	80,142	360,367	103,527
16	446,49	55,616	376,766	88,04	353,406	91,314	338,902	107,515
18	377,996	52,385	339,508	74,971	330,956	91,364	316,298	110,278
20	327,434	58,5	303,114	72,703	293,541	89,475	288,301	107,222
22	307,728	49,122	266,658	65,105	263,981	85,927	260,295	103,472
24	277,352	52,547	243,2	70,45	236,145	85,445	234,437	101,259
26	243,55	52,186	214,245	67,38	209,171	81,236	209,26	97,581
28	211,147	51,782	185,703	68,194	183,285	80,084	185,767	93,847
30	176,599	51,562	162,066	68,533	160,67	76,515	162,054	86,526
32	343,138	46,946	136,864	64,573	134,824	67,551	134,936	74,422
34	148,651	69,463	107,936	52,489	105,979	55,349	109,943	59,249
36	126,086	37,37	72,649	40,254	71,06	40,99	70,75	44,229
38	19,81	47,62	37,795	25,79	39,431	26,514	37,921	26,974
40	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura B 1 Tensões totais ao longo da altura da barragem, correspondentes para o caso sem saturação da Fig. 3.6